



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

## ÚSTAV CHEMIE POTRAVIN A BIOTECHNOLOGIÍ

INSTITUTE OF FOOD SCIENCE AND BIOTECHNOLOGY

# VÝROBA A CHARAKTERIZACE BIOUHLU ZE SMĚSNÉHO ROSTLINNÉHO ODPADU

PRODUCTION AND CHARACTERIZATION OF BIOCHAR FROM MIXED PLANT WASTE

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Bureš

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaromír Pořízka, Ph.D.

BRNO 2023

## Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1792/2022 Akademický rok: 2022/23  
Ústav: Ústav chemie potravin a biotechnologií  
Student: **Vojtěch Bureš**  
Studijní program: Chemie a technologie potravin  
Studijní obor: Biochemická technologie  
Vedoucí práce: **Ing. Jaromír Pořízka, Ph.D.**

### Název bakalářské práce:

Výroba a charakterizace biouhlu ze směsného rostlinného odpadu

### Zadání bakalářské práce:

1. Zpracujte literární rešerši
2. Vyroberte různé typy biouhlu ze zahradního odpadního materiálu
3. Charakterizujte připravené vzorky z hlediska základních chemických a fyzikálních parametrů definovaných v rámci certifikátu European biochar
4. Statisticky vyhodnoťte výsledky a formulujte závěry práce

### Termín odevzdání bakalářské práce: 22.5.2023:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

-----  
Vojtěch Bureš  
student

-----  
Ing. Jaromír Pořízka, Ph.D.  
vedoucí práce

-----  
prof. RNDr. Ivana Márová, CSc.  
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2023

-----  
prof. Ing. Michal Veselý, CSc.  
děkan

## **ABSTRAKT**

Tato práce byla zaměřená na výrobu biouhlu ze směsného rostlinného odpadu v kontextu domácích zahrad a malých farem. Cílem práce bylo z běžného směsného zahradního odpadního materiálu vyrobit různé typy biouhlu a následně jej charakterizovat podle klasifikace Evropského biouhelného certifikátu (EBC), dále také vytvořit metodiku pro domácí výrobu biouhlu dle současných poznatků. Čtyři z pěti vyrobených biouhlů splnily všechna kritéria pro kategorii EBC-Feed a jsou proto vhodné pro jakoukoliv formu využití včetně výroby krmiv. Poslední vzorek z důvodu nadlimitních obsahů polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU) nesplnil parametry EBC pro využitelné biouhly, ale podle soudobých studií a nových limitních hodnot Evropské unie pro hnojiva a hnojivé výrobky zjištěné koncentrace PAU nebrání jeho aplikaci do zemědělské půdy. Na základě poznatků této práce proto lze doporučit domácí výrobu biouhlu a jeho aplikaci do zemědělské půdy pro dlouhodobé zlepšení její kvality.

## **ABSTRACT**

This work focused on biochar production from mixed vegetable waste in the context of home gardens and small farms. The aim of the work was to produce different types of biochar from common mixed garden waste material and then to characterize it according to the European Biochar Certificate (EBC) classification, as well as to develop a methodology for household biochar production, according to current knowledge. Four of the five biochar samples produced met all the criteria for the EBC-Feed category and are therefore suitable for any form of use, including animal feed production. The last sample did not meet the EBC parameters for usable biochar due to above-limit levels of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), but according to current studies and the new European Union limit values for fertilisers and amendments, the detected PAHs concentrations do not prevent its application to agricultural land. Therefore, based on the findings of this work, it is possible to recommend domestic production of biochar and its application to agricultural soils for long-term improvement of soil quality.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

biouhel, Kon-Tiki pec, domácí výroba, charakterizace biouhlu

## **KEYWORDS**

biochar, Kon-Tiki kiln, household production, biochar characterization

BUREŠ, Vojtěch. *Výroba a charakterizace biouhlu ze směsného rostlinného odpadu* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/149082>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie potravin a biotechnologií. Vedoucí práce Jaromír Pořízka.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny mnou použité zdroje jsou správně a úplně citovány. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

---

Podpis autora

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu Ing. Jaromíru Pořízkovi, Ph.D. za odborné vedení a zastřešení práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Martinu Gajduškovi za velkou pomoc při práci v laboratoři a připomínky k výsledné podobě této práce. Nakonec bych chtěl poděkovat environmentálnímu školskému zařízení Lipka, pracovišti Kamenná, za poskytnutí části vzorků pro tuto práci.

## OBSAH

1.	Úvod.....	7
2.	Teoretická část.....	8
2.1.	Definice a původ biouhlu.....	8
2.2.	Odpadní biomasa pro výrobu biouhlu .....	8
2.3.	Klasifikace biouhlu.....	9
2.3.1.	Chemické složení .....	9
2.3.2.	Specifický povrch.....	9
2.3.3.	Konečná aplikace .....	10
2.4.	Dílčí kroky v produkci biouhlu .....	10
2.4.1.	Výběr vstupní suroviny .....	10
2.4.2.	Sušení .....	11
2.4.3.	Výroba biouhlu.....	11
2.5.	Vliv biouhlu na kvalitu půdy.....	13
2.5.1.	Schopnost vázat vodu.....	13
2.5.2.	Vliv na biologickou dostupnost biogenních látek.....	13
2.5.3.	Úprava pH půdy .....	13
2.5.4.	Stabilizace půdního uhlíku.....	14
2.6.	Výroba pevného biouhlu.....	14
2.6.1.	Průmyslová velkovýroba.....	14
2.6.2.	Tradiční výroba .....	14
2.6.3.	Domácí produkce a malovýroba .....	15
2.7.	Zpracování malovýrobního rostlinného odpadu.....	15
2.7.1.	Kompostování .....	16
2.7.2.	Pyrolýza.....	16
2.7.3.	Alternativní využití nekompostovatelného odpadu .....	17
2.8.	Analýza biouhlu.....	17
2.8.1.	Granulometrie .....	17
2.8.2.	Analýza povrchu a povrchových vlastností .....	17

2.8.3.	Stanovení zádržnosti vody .....	18
2.8.4.	Stanovení pH a vodivosti výluhu .....	19
2.8.5.	Prvkové složení .....	19
2.8.6.	Stanovení obsahu PAU .....	20
3.	Experimentální část .....	22
3.1.	Materiál, chemikálie a přístroje .....	22
3.1.1.	Materiál .....	22
3.1.2.	Chemikálie .....	22
3.1.3.	Přístroje a vybavení .....	22
3.2.	Pracovní postup .....	23
3.2.1.	Výroba biouhlu a potřebného vybavení .....	23
3.2.2.	Stanovení pH výluhu .....	25
3.2.3.	Stanovení elektrické vodivosti výluhu .....	25
3.2.4.	Stanovení zádržnosti vody .....	25
3.2.5.	Prvková analýza .....	26
3.2.6.	Stanovení PAU .....	27
3.2.7.	FTIR analýza biouhlů .....	29
3.2.8.	Stanovení měrného povrchu .....	29
4.	Výsledky a diskuze .....	30
4.1.	Výroba biouhlu .....	30
4.2.	Stanovení pH výluhu biouhlů .....	31
4.3.	Stanovení vodivosti výluhu .....	33
4.4.	Stanovení obsahu vybraných prvků .....	36
4.5.	Stanovení zádržnosti vody biouhlem .....	40
4.6.	FTIR analýza povrchu .....	42
4.7.	Stanovení měrného povrchu .....	44
4.8.	Stanovení PAU .....	45
5.	Závěr .....	50
6.	Seznam použité literatury .....	51
7.	Seznam použitých zkratk .....	63

## 1. ÚVOD

Všechny potraviny, které každodenně konzumujeme, mají svůj původ v zemědělství. Jako potraviny využíváme celou paletu rostlin, živočichů, hub nebo řas, ale jen ve výjimečných případech konzumujeme celý organismus beze zbytku. V zemědělských výroбах proto nevyhnutelně dochází k produkci odpadní biomasy. Odpadní produkty tohoto typu jsou buď rostlinného původu (nepoživatelné části rostlin, listí, uhynulé rostliny, napadené nebo jinak kontaminované potraviny aj.) nebo živočišného původu (hnůj, podestýlka z drůbežáren, nezpracovatelné živočišné části atd).

V případě rostlinného odpadu se tento potenciálně využitelný materiál dále zpracovává obvykle kompostováním nebo zaoráním, je ale také často spalován. Spálením biomasy bohužel dochází k uvolnění velkého množství CO<sub>2</sub> a dalších skleníkových plynů a také ke ztrátě materiálu, který lze využít pro zúrodnění zemědělské půdy nebo pro jiné biotechnologické procesy. Některé materiály bohužel nelze efektivně kompostovat, obvykle z důvodu dlouhého rozkladu (převážně se jedná o dřevitý materiál). Alternativní možností zpracování tohoto odpadu je jeho přeměna na biouhel, který může mít dlouhodobě pozitivní vliv na kvalitu půdy a na půdní ekosystém.

Biouhel je zuhelnatělý materiál, který je aplikován do půdy za účelem zlepšení jejích vlastností nebo za účelem dlouhodobého uložení uhlíku v půdě. V Evropské unii zastřešuje téma biouhlu Evropský biouhelný certifikát (EBC), vytvořený Ithackým institutem pro strategie využití uhlíku [1]. Tento certifikát byl vytvořen za účelem standardizace biouhlu pro evropský trh a s cílem snížit rizika výroby a aplikace biouhlu na zdraví člověka a životní prostředí. Certifikace EBC také uvádí podrobnou metodiku analýz, klasifikace, kontroly výroby atd [2].

V posledních desetiletích se světová pozornost stále více zaměřuje na změny životního prostředí, způsobené činností člověka. Jedním z významných faktorů, ovlivňující tyto změny, je také zvyšování koncentrace CO<sub>2</sub> v ovzduší. Obzvláště v Evropské unii je proto snaha optimalizovat všechny důležité oblasti lidského života tak, aby v jejich průběhu docházelo ke snížení nebo ideálně k úplnému omezení emisí CO<sub>2</sub> [3]. Zdaleka největší vliv na zachytávání CO<sub>2</sub> z evropského ovzduší mají lesní ekosystémy, které jsou schopny každoročně vstřebat více než  $25 \cdot 10^9$  kg atmosférického CO<sub>2</sub> za rok, vlivem buněčného dýchání ale přibližně stejné množství CO<sub>2</sub> opět vypustí zpět. Akumulace uhlíku v lesních porostech je proto velmi pomalá, navíc je tento uhlík akumulovaný v biologicky dostupné, tudíž nestabilní formě [4]. Biouhel může sloužit jako vysoce stabilní forma uložení uhlíku v půdě. Podle některých studií by celosvětově mohlo být teoreticky možné v dlouhodobém ve formě biouhlu uložit až  $1,8 \cdot 10^{12}$  kg CO<sub>2</sub> za rok [5].

## 2. TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1. Definice a původ biouhlu

Podle EBC je biouhlem míněn porézní, uhelný materiál, vyrobený pomocí pyrolýzy z biomasy, který je aplikován za účelem dlouhodobého zachycení uhlíku nebo jako zdroj uhlíku pro průmyslové výroby. Od běžného dřevěného uhlí se pak dle definice EBC odlišuje svým následným využitím a vstupním materiálem (dřevěné uhlí je vyrobeno ze dřeva a slouží jako zdroj energie, biouhel může být vyroben z různých typů vstupní biomasy a nesmí být použit jako palivo) [2]. Podle jiné definice lze biouhel také definovat jako zbytek po pyrolýze biomasy v prostředí, kde je částečný nebo úplný nedostatek kyslíku. Biouhel zároveň nesmí být využit jako zdroj uhlíku pro ocelářské účely nebo jako palivo pro hutní průmysl [6].

Dřevěné uhlí bylo používáno po staletí při zpracování železné rudy nebo jako palivo. Kromě jeho cílené výroby v mlířích vznikalo jako vedlejší produkt při přirozených nebo umělých požárech lesů [7]. Při přeměně lesa na pastvinu nebo pole byl popel a dřevěné uhlí hlavním zdrojem živin a zkracoval dobu potřebnou pro úspěšnou přeměnu lesních porostů na hospodářsky užitnou půdu. Tento postup byl zároveň nejméně časově náročný a byl proto hojně využíván pro získání nových zemědělských ploch [8].

Historicky nejstarší cílená aplikace biouhlu byla popsána v Amazonských půdách, takzvaných Terra preta. Tyto původně neúrodné půdy místní domorodé kmeny po staletí zúrodnily postupným přidáváním dřevěného uhlí, jehož výsledná koncentrace v některých oblastech dnes dosahuje téměř 20 hm. %. Tyto půdy vykazují až trojnásobnou úrodnost ve srovnání s okolní původní půdou, a to i několik set let po jejich vzniku [9].

### 2.2. Odpadní biomasa pro výrobu biouhlu

Odpadní biomasa v zemědělských provozech je velmi rozmanitá, ale lze ji rozdělit do několika málo kategorií: dřevnatý odpad, bylinný odpad, travnatý odpad a hnoje. Z pohledu efektivního využití těchto odpadů je výhodnější hnojí zaorat zpět do půdy, posečenou travu lze také účinně kompostovat. Odpadní biomasu dřevitého a bylinného charakteru je poté možné účinně využít jako vstupní surovinu pro výrobu biouhlu [10]. Pro výrobu biouhlu se běžně využívá odpad ze zpracování dřeva (jehličí, kůra, piliny, hobliny), zemědělský a potravinářský odpad (sláma, obilné otruby, pomerančové slupky, některé druhy hnojů, vnější obaly skořápkových plodů) a jiné průmyslové odpady (pevný odpad, vzniklý při recyklaci papíru). Biouhel se také vyrábí z rychle rostoucí biomasy, cíleně pěstované za účelem výroby biouhlu. Pro tento účel se využívá zejména topol, bambus a jiné rychle rostoucí traviny [11].

Biomasa se obecně skládá z různých podílů celulózy, hemicelulóz a ligninu. Celulóza je polysacharid, tvořený lineárním řetězcem (1,4)-D-glukopyranózových jednotek, navzájem spojených  $\beta$ -1,4 glykosidovými vazbami, o molekulové hmotnosti přibližně 100000 Da. Celulóza je obvykle nejvíce zastoupenou frakcí, tvořící 40-50 % hmotnosti biomasy. V průběhu pyrolýzy se celulóza rychle rozkládá převážně v rozmezí 315-400 °C. Hlavním produktem tepelného rozkladu celulózy je levoglukosan, ten se ale při vyšších teplotách také rozpadá [12].



Hemicelulóza se oproti celulóze skládá nejen z glukózových jednotek, ale obsahuje také manózu, xylózu, arabinózu a další. Utváří větvené řetězce, které jsou nekovalentními silami spojené s vlákny celulózy. Při zahřívání dochází k rozkladu hemicelulózy v teplotním rozmezí 250-350 °C. Lignin je polyfenolická látka, která je tvořena především polymerovaným p-kumarylalkoholem, koniferylalkoholem a sinapylalkoholem. Oproti celulóze a hemicelulóze je nejodolnější vůči termolýze, rozkládá se při teplotě 300-550 °C. [13].

### 2.3. Klasifikace biouhlu

Vzhledem k velké rozmanitosti podmínek vzniku, vstupních materiálů a zamýšlených použití může mít finální biouhel různé vlastnosti. Podle rozdílů v těchto vlastnostech lze biouhel rozdělit podle různých kritérií:

#### 2.3.1. Chemické složení

Chemické složení biouhlu je přímo spojeno se složením zpracovávané biomasy a s teplotou pyrolýzy. Biomasa se skládá převážně z uhlíku, vodíku, kyslíku a dusíku (poměry H:C pro surovou biomasu se pohybují v rozmezí přibližně 1,4-1,8:1, poměr O:C 0,5-0,9:1), dále biomasa obsahuje draslík, fosfor a další prvky, které jsou obsaženy v popelu. Čím dokonaleji proběhne pyrolýza, tím nižší jsou výsledné poměry O:C, H:C a N:C. Se vzrůstající teplotou se současně zvyšuje hmotnostní zastoupení P a K. V závislosti na způsobu výroby biouhlu se mění poměr kyslíku a vodíku vůči uhlíku, kde při použití vysokoteplotního zuhelnatění jsou výsledné poměry H:C v rozmezí 0,6-1,4:1, v případě pomalé pyrolýzy je možné připravit biouhel s poměrem H:C 0,1-0,7:1. Pro oba výše zmíněné postupy je poměr O:C v rozsahu přibližně 0,1-0,4:1 [14].

Od určité teploty pyrolýzy (okolo 350 °C) zároveň dochází k postupnému zvyšování zastoupení popela v biouhlu, k vyššímu obsahu popela také dochází při improvizované výrobě biouhlu, kde přítomnost popela v oxidační vrstvě slouží jako signál pro přidání další vrstvy biomasy [15].

#### 2.3.2. Specifický povrch

Typickou vlastností biouhlu je jeho vysoce porézní povrch, který je jak makroporézní, tak mikroporézní. Makropóry mají průměr přibližně 1 μm a významně se podílejí na zadržování vody v půdě. Mikropóry mají průměr v řádu jednotek až stovek nanometrů. Z hlediska záchyty vody je jejich vliv zanedbatelný, ale díky svému velkému povrchu jsou hlavním místem záchyty kontaminantů z okolí. Pomocí vhodně zvolených výrobních podmínek lze cíleně vyrobit „aktivní“ biouhel, který lze využít pro čištění vody nebo půdy, další možností výroby aktivního biouhlu je jeho dodatečná úprava [16].

Povrch biouhlu také obsahuje funkční skupiny, v závislosti na charakteru těchto skupin může biouhel sloužit jako sorbent kontaminantů nebo jako nosič hnojiv. Tyto funkční skupiny mohou být buď polárního charakteru (-COOH, -OH) nebo nepolárního (nepolární uhlovodíkové řetězce). Na případné adsorpci se podílí také elektrostatické interakce mezi povrchem biouhlu a kontaminanty [11]. Adsorpce kontaminantů v podobě kationtů těžkých kovů může probíhat také ve formě kationtové výměny za ionty Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> a Mg<sup>2+</sup> [17].

### 2.3.3. Konečná aplikace

EBC rozeznává několik tříd biouhlu podle zamýšleného využití a potřebné certifikace. Jedná se například o biouhel EBC-Feed, který musí splňovat všechny požadavky Evropské unie na látky pro výrobu krmiv a využívá se pro výrobu krmiv pro hospodářská zvířata. Další třídy, určené pro zemědělské aplikace, jsou EBC-Agro a EBC-AgroOrganic, tyto kategorie biouhlu musí splňovat všechny parametry hnojiv, stanovené v rámci Evropské unie. Pro použití v nezemědělských aplikacích jsou využívány biouhly třídy EBC-BasicMaterials a EBC-Urban. EBC-BasicMaterials je využíván pro průmyslové výroby a na jeho kvalitu jsou kladeny nejnižší nároky, EBC-Urban nachází uplatnění v okrasném zahradnictví a městských aplikacích. Tyto třídy biouhlu nesplňují požadavky pro pěstování potravin. Biouhly, spadající do kategorie EBC-ConsumerMaterials, jsou určeny pro přímý styk s kůží a pro potravinářské aplikace. Přesná charakteristika jednotlivých tříd je dále ovlivněna legislativou jednotlivých členských států EU [2].

### 2.4. Dílčí kroky v produkci biouhlu

Při výrobě biouhlu dochází k několika procesům, z nichž každý vede ke vzniku konkrétního produktu. Průběh těchto procesů je ovlivněn především vlastnostmi vstupní biomasy, přítomností kyslíku a teplotou. Výrobní postup je možné rozdělit na tři části – příprava biomasy, výroba biouhlu a úprava biouhlu před jeho aplikací.

#### 2.4.1. Výběr vstupní suroviny

Pro výrobu biouhlu je možné využít dva základní typy biomasy – plodinu, pěstovanou přímo za účelem následné výroby biomasy, a odpadní produkt rostlinné či živočišné výroby. Pro celou výrobní operaci je výhodnější použít cíleně pěstovanou biomasu, která má obvykle v čase sklizně nízký obsah vody a není ji proto potřeba dále sušit. Oproti odpadním produktům zemědělské výroby ale pěstování těchto plodin zabírá zemědělskou půdu, kterou by jinak bylo možné využít pro pěstování výnosnějších plodin. Pro výrobu biouhlu se pěstují některé druhy trav a rychle rostoucích dřevin (ozdobnice čínská, proso, bambus a další), které lze ale také využít jako píceinu [14].

Oproti výše zmíněným vstupním surovinám má využití odpadní biomasy pro výrobu biouhlu několik výhod. Jejím zpracováním lze využít ekonomicky prakticky bezcenné odpady pro přípravu dobře prodejného produktu, oproti kompostování je celý proces mnohem rychlejší a díky své povaze odpadní produkty nezabírají zemědělsky využitelnou půdu. Největší nevýhodou odpadní biomasy je ale často její vysoká vlhkost a různorodé složení. Z pohledu průmyslové výroby je další komplikací skutečnost, že produkce odpadní biomasy není v průběhu roku rovnoměrná. Při samotné produkci je také potřeba mokrou biomasu sušit, a to obvykle pomocí energeticky vysoce náročných metod – po sklizni jsou v zemědělství sušící procesy zodpovědné až za 70 % spotřeby elektrické energie [18].

Z výše uvedených důvodů je proto nejvhodnější vstupní surovinou přirozeně suchý odpadní materiál, kterým jsou například obilné otruby nebo dřevěné piliny z pily. Absence potřeby sušení umožňuje jeho rychlé uskladnění v případě náhlého vzniku velkého množství odpadu, suchou

biomasy lze zpracovat všemi metodami výroby biouhlu a celkové energetické nároky na výrobu jsou oproti využití mokré biomasy nižší. Většina biouhlu je proto vyráběna z materiálů, které jsou přirozeně suché [19].

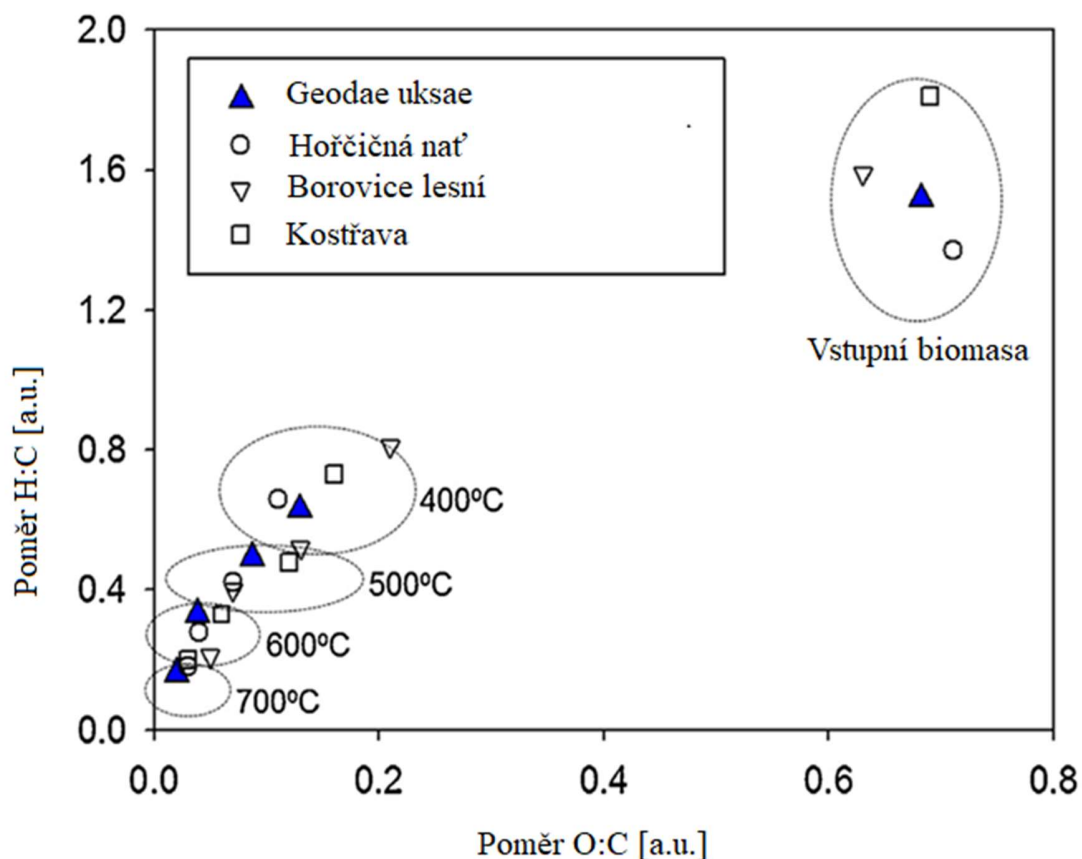
#### **2.4.2. Sušení**

Pyrolyticky lze účinně zpracovat pouze dostatečně suchý materiál, protože materiály s vysokou vlhkostí vyžadují příliš mnoho energie pro samotnou pyrolýzu. Materiál lze vysušit pomocí tepla vznikajícího spalováním syngasu. Nejeekonomičtější metodou sušení je ale bezesporu vysušení biomasy pomocí slunečního svitu nebo volným prouděním vzduchu, v případě výroby z cíleně pěstované biomasy pak přímá sklizeň suché biomasy. Sušení pomocí sluneční energie ale není vhodné pro průmyslovou výrobu, která vyžaduje konstantní přísun standardního materiálu, proto se využívá převážně pro improvizovanou výrobu biouhlu. V průmyslových podmínkách lze také zpracovat vlhký materiál vodním tepelným zuhelněním bez nutnosti sušení. [20].

#### **2.4.3. Výroba biouhlu**

Biouhel lze vyrobit několika metodami, které se od sebe liší teplotou, přítomností kyslíku nebo přítomností vody. Výstupem výrobního procesu je směs plynů (syngas), kapalných a pevných látek, jejichž poměr se mění v závislosti na použité metodě. Podle podmínek výroby může být biouhel vyroben pyrolýzou, zplyněním, vodním termálním zuhelněním nebo bleskovou pyrolýzou. Obecně ale platí, že výroba biouhlu probíhá za vysokých teplot v prostředí s částečným nebo žádným přístupem kyslíku [21].

Pyrolýza je rozklad biomasy za atmosférického tlaku v bezkyslíkatém prostředí při teplotě přibližně 300-900 °C [14]. Při pyrolýze se rozkládá celulósová a ligninová struktura rostlinné biomasy za vzniku jak pevných produktů (uhlu), tak kapalných (bioolej) a plyných (syngas tvořený H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, a C<sub>1</sub>-C<sub>3</sub> produkty). Poměr těchto produktů udává především teplota pyrolýzy (např. k nejvyšší produkci oleje dochází při teplotě 500 °C [22]). Teplota pyrolýzy také ovlivňuje poměr vodíku a uhlíku (H-C) a kyslíku a uhlíku (O-C) ve výsledném produktu, tento poměr se stoupající teplotou pyrolýzy postupně klesá. V závislosti na rychlosti ohřevu biomasy lze pyrolýzu rozdělit na pyrolýzu pomalou (torefakce), rychlou a bleskovou. Při pomalé pyrolýze se biomasa ohřívá rychlostí zhruba 4-10 °C/min, při rychlé až 60 °C/min. Pomalejší ohřev vede k vyšším výtěžkům pevného biouhlu, rychlejší k vyšším výtěžkům biooleje. V některých případech také dochází ke spálení kapalných a plyných produktů, obzvláště za vysokých teplot proto může být jediným produktem pevný uhlí [20].



Obrázek 1 – Závislost poměrů H/C a O/C na teplotě pyrolýzy různých vstupních biomas. Převzato a upraveno [20]

Zplynění je proces částečné oxidace uhlíkatého materiálu (v případě výroby biouhlu biomasy) za vzniku plyných, kapalných a pevných produktů. Reakce zplynění probíhá za účasti malého množství vodní páry a kyslíku při teplotách přesahujících 700 °C. Oproti pyrolýze se vyznačuje výrazně nižší produkcí pevného biouhlu a vyšším podílem plyných produktů. Tento proces proto není vhodný pro cílenou výrobu pevného biouhlu, ale v improvizované podobě produkce k němu nevyhnutelně dochází [23].

Jak pyrolýza, tak zplynění vyžadují suchou vstupní biomasu. V reálných podmínkách ovšem biomasa obvykle obsahuje vyšší zastoupení vody, což zvyšuje energetické nároky na její vysušení. Tento problém lze vyřešit vodním termálním zuhelnatěním, kde je vlhká biomasa pod tlakem zahřívána na výslednou teplotu až více než 400 °C. V závislosti na teplotě pak dochází ke vzniku pevného biouhlu (do 250 °C), biooleje (250-400 °C) a plyných produktů (>400 °C) [20].

Blesková pyrolýza je rychlá pyrolýza za zvýšeného tlaku (1 MPa a vyšší). Stejně jako vodní termální zuhelnatění ale proces bleskové pyrolýzy vyžaduje vysoký tlak a komplexní reaktor, proto obě tyto metody nejsou pro malovýrobní použití v domácích podmínkách vhodné [20].

Volbou metody výroby biouhlu lze velmi ovlivnit poměr zastoupení požadovaného produktu. Pro získání pevného biouhlu je nejvhodnější pomalá pyrolýza bez přístupu kyslíku, kterou lze získat

produkt, obsahující až 35 hm. % pevného biouhlu. Pro získání kapalného biouhlu (bioolej) je vhodná především rychlá pyrolýza bez přístupu kyslíku, kterou lze získat produkt, tvořený až 70 hm. % bioolejem. Plynné produkty poté v nejvyšším zastoupení produkuje zplynění nebo vodní tepelné zuhelnatění, kterým lze získat až 70 hm. % plynné frakce biouhlu. [23].

## **2.5. Vliv biouhlu na kvalitu půdy**

### **2.5.1. Schopnost vázat vodu**

Biouhel má díky své poréznosti a vysoké stabilitě schopnost významně zadržovat vodu v půdě (například terra preta dokáže vázat až o 18 % více vody než okolní půda [24], v některých typech půd je možné přidáním 8 g biouhlu na 1 kg půdy zvýšit zadržnost vody až o 36 % [25]). Biouhel je proto vhodným aditivem pro okamžité a dlouhodobé zvýšení schopnosti půdy zadržovat vodu. Biouhel, připravený pyrolýzou za nižších teplot, ovšem může vykazovat hydrofobní vlastnosti vlivem olejových produktů pyrolýzy, a tím i nízkou schopnost vázat vodu [26].

Pro zemědělské potřeby lze proto doporučit aplikaci biouhlu především v sušších, písčitéch půdách. V jílovitých půdách, kde lze předpokládat nízkou propustnost vody, byl pozorován neutrální či dokonce negativní vliv aplikace biouhlu, způsobený nejspíše vlivem přílišného zvýšení schopnosti půdy zadržovat vodu, což vedlo k hnilobným nemocem kořenů rostlin [6].

### **2.5.2. Vliv na biologickou dostupnost biogenních látek**

Při výrobě biouhlu dochází k postupnému odstraňování těžavějších látek (voda,  $\text{NO}_x$ , vodík, nízkouhlíkaté řetězce aj.) a tím k zkoncentrování obsahu uhlíku a minerálních látek, často za vzniku popela. Tento popel je bohatý na fosfor, draslík a další minerální látky, které mohou být následně využity pro výživu organismů. Po přidání biouhlu byl v zemědělských půdách pozorován významný a poměrně dlouhodobý nárůst koncentrace fosforu, v případě aplikace biouhlu vyrobeného z živočišného odpadu nebo za vyšší teploty byl tento vliv intenzivnější [27].

Pro biouhel je obvyklý vysoký specifický povrch. Na povrchu biouhlu se nachází různé funkční skupiny (karboxylové, hydroxylové, laktonové aj.), které umožňují vratně vázat amonné a  $\text{NO}_x^-$  ionty (schopnost adsorpce těchto iontů se po přesáhnutí výrobní teploty 600 °C snižuje, především vlivem odstraňování těchto funkčních skupin) [28]. Po aplikaci neošetřeného biouhlu proto vlivem adsorpce amonných iontů z půdy dochází ke snížení koncentrace biologicky dostupného dusíku. Biouhel proto bývá obvykle aplikován v kombinaci s hnojivem, které tento deficit vyrovnává. Hlavním pozitivním efektem biouhlu na obsah biologicky dostupného dusíku v půdě je jeho schopnost významně snižovat odplavování biologicky dostupných živin vlivem přívalových dešťů nebo běžného zavlažování. Dusík vázaný na povrch biouhlu se ve srovnání s dusíkem, obsaženým v běžných hnojivech, uvolňuje pomaleji a rovnoměrněji [29].

### **2.5.3. Úprava pH půdy**

Vzhledem k zásaditému charakteru biouhlu lze využít biouhel pro zvýšení pH půdy. Míra změny po přidání biouhlu je úzce propojená s charakterem půdy, jejím původním pH, vlastnostmi přidaného biouhlu a dalšími faktory [30]. Většina rostlin roste lépe v neutrálním nebo slabě

bazickém pH, některé rostliny pro svůj růst přímo vyžadují vyšší hodnoty pH. Zvýšení pH půdy je proto často přínosným krokem pro zvýšení výnosů [31]. Nižší pH ( $\text{pH} < 5$ ) také zvyšuje mobilitu a biologickou dostupnost iontů  $\text{Al}^{3+}$ , které působí negativně na růst kořenů rostlin [32]. V případě aplikace biouhlu do zemědělské půdy, využívané pro pěstování kyselomilných rostlin (brusnice, angrešt aj.), ale může naopak dojít vlivem zvýšení pH ke snížení výnosů nebo úhynu rostlin.

#### **2.5.4. Stabilizace půdního uhlíku**

V půdě je uhlík obsažen především v organické složce půdy, kterou z velké většiny tvoří humus. Složení humusu je konstantní, jednotlivé prvky jsou zastoupeny v přibližném poměru C:N:P:S 10000:833:200:143 [33]. Toto zastoupení jednotlivých prvků v humusu je také spojené s jeho stabilitou a rychlostí vzniku – prvek, v půdě zastoupený v nižší koncentraci, než je uvedený poměr, slouží jako limitující faktor pro vznik humusu (i při přebytku ostatních prvků). Stabilizace jedné tuny uhlíku ve formě humusu proto vyžaduje 80 kg N, 20 kg P a 14 kg S [34]. Stabilita biouhlu ale není ovlivněna tímto poměrem (biouhel není tvořený humusem) a může proto stabilizovat uhlík v půdě nezávisle na obsahu N, P a S. Tato možnost dlouhodobého uskladnění uhlíku v půdě se proto v poslední době dostává do popředí jako jedna z možností snížení obsahu  $\text{CO}_2$  v ovzduší [5].

### **2.6. Výroba pevného biouhlu**

#### **2.6.1. Průmyslová velkovýroba**

Pevný biouhel se průmyslově vyrábí převážně pyrolýzou nebo kombinovaně zplyněním a následnou pyrolýzou. Pro účely této práce byl jako příklad použit výrobní postup firmy Biochar Solutions. Výrobní zařízení této firmy umožňuje kontinuální pyrolýzu dřevní štěpky, ořechových skořápek a dalších dřevěných sypkých materiálů. Zařízení se skládá ze dvou reaktorů v sériovém zapojení. V prvním reaktoru dochází při teplotě 500-700 °C po dobu asi jedné minuty ke zplynění v částečně kyslíkatém prostředí, plynné produkty jsou následně využity jak zdroj energie celého výrobního procesu. Ve druhém reaktoru poté probíhá v bezkyslíkatém prostředí pyrolýza po dobu až 14 minut při teplotě 300-550 °C. Produktem celého výrobního procesu je biouhel ve dvou frakcích – 80 % tvoří biouhel o přibližné velikosti  $1 \times 1,5 \times 1,5$  cm, 20 % poté uhelný prach [35].

Průmyslová výroba umožňuje přesně volit podmínky pyrolýzy nebo zplynění vstupní biomasy, což znamená i možnost výroby biouhlu s konkrétními požadovanými vlastnostmi. Zároveň je při průmyslové výrobě zpracováván syngas (obvykle pro vyhřívání reaktoru, ve kterém probíhá pyrolýza), který může obsahovat toxické nebo významné skleníkové plyny [36].

#### **2.6.2. Tradiční výroba**

Dřevěné uhlí se již po staletí vyrábí v milířích. První milíře byly původně tvořeny natěsno naskládaným dřevem, které bylo obaleno silnou vrstvou hlíny. Po uschnutí hliněného obalu v něm byly proraženy otvory pro vzduch, dřevo v milíři bylo zapáleno a poté, co z milíře přestal vycházet bílý dým, byly otvory ucpány hlínou. Vzniklé dřevěné uhlí bylo poté použito jako palivo, pro zpracování železné rudy, nebo bylo zaryto do zemědělské půdy. Vzhledem ke způsobu výroby lze

předpokládat, že takto vyrobené dřevěné uhlí má vlastnosti srovnatelné s vlastnostmi biouhlu vyrobeného zplyněním při vysoké rychlosti ohřevu a následnou pyrolýzou za vysoké teploty, trvající až několik hodin [37].

Tradiční výrobní procesy byly vždy diskontinuální a kvalita každé výrobní dávky se vzhledem k rozdílným velikostem milíře a různorodé vstupní biomase výrazně lišila. Milíř byl obvykle stavěn pokaždé na stejném místě, proto lze na místě, kde tradiční výroba dřevěného uhlí probíhala, najít směs popela a dřevěného uhlí ve vrstvě až 30 cm [37].

### **2.6.3. Domácí produkce a malovýroba**

Pro potřeby rodinné zahrady nebo pro malopěstitelské účely lze vyrábět biouhel z nekompostovatelného rostlinného odpadu (větve z prořezu stromů, štěpka, živočišný odpad aj). Na internetu lze najít mnoho návodů na výrobu biouhlu. Nejrozšířenějším postupem je vykopání kuželovité jámy, na dně této jámy je rozdělán oheň a postupně se do něj ve vrstvách přikládají kusy zpracovávané biomasy. Příkladá se vždy v momentě vzniku bílé vrstvičky popela na povrchu hořícího materiálu. Po spotřebování biomasy (nebo naplnění jámy) je pak jáma zalita velkým přebytkem vody, aby bylo zajištěno dokonalé uhašení směsi. Namísto kuželové jámy v zemi lze využít jakoukoliv velkou kovovou nádobu (obvykle plechový sud na vodu), postup výroby biouhlu v takové nádobě je pak obdobný s postupem výroby v kuželové díře. Komerčně prodávanou aparaturou pro domácí výrobu biouhlu je například Kon-Tiki pec, tvar této pece je obdobný s tvarem jámy pro výrobu biouhlu [38].

Všechny výše uvedené výrobní postupy jsou v podstatě různými adaptacemi tradičního výrobního postupu přípravy dřevěného uhlí. Výhodou těchto improvizovaných metod je možnost přípravy biouhlu v malých množstvích (řádově kilogramy až desítky kilogramů v jedné dávce), tyto metody navíc umožňují zpracovat i malá množství vstupní biomasy (pro iniciaci pyrolýzy stačí ve srovnání s velkovýrobními reaktory výrazně nižší hmotnost zpracovávaného odpadu). Tento výrobní proces je ale časově náročný a ve srovnání s moderními automatizovanými výrobními linkami málo výnosný [37].

### **2.7. Zpracování malovýrobního rostlinného odpadu**

Rostlinný odpad, vznikající při běžných zemědělských technologických operacích, se běžně zpracovává kompostováním, zaoráním nebo spalováním. Kompostovat lze většinu rostlinného odpadu, ale dřevnatý a pomalu se rozkládající odpad nelze efektivně kompostovat (kompostování by v tomto případě bylo časově náročné). Nekompostovatelné rostlinné odpady se proto nejčastěji spalují, obvykle bez současného využití spalovacího tepla. Pyrolýza tohoto odpadu je proto vhodnou alternativou, která místo popela, vzniklého spálením, poskytuje biouhel, kterým lze dále zvýšit kvalitu obdělávané půdy [39].

Malovýrobní rostlinný odpad je nevyhnutelně velmi různorodý, jeho množství a forma se v průběhu hospodářského roku mění a vzniká často v nepředvídatelném množství (například částečné znehodnocení úrody vlivem dlouhých dešťů). Jeho zpracování se proto mění v závislosti na poměru a charakteru jednotlivých složek, vlhkosti biomasy a na jejím množství.

### 2.7.1. Kompostování

V prostředí domácích zahrad a menších farem lze velmi často najít prostor, vyhrazený pro průběh kompostovacích procesů. Velkopěstitelé často zpracování rostlinného odpadu na kompost a jeho následné využití neprovádějí, převážně z důvodu časové náročnosti a dostupnosti levných a vysoce účinných syntetických hnojiv. Tyto a další důvody kolektivně přispívají k tomu, že velkopěstitelé sami často rostlinný odpad nezpracovávají a využívají služeb kompostáren nebo jiné způsoby likvidace bioodpadu. Jen v České republice je momentálně v provozu více než 550 fungujících kompostáren [40].

Kompostování je biooxidativní aerobní proces, v jehož průběhu dochází ke vzniku huminových látek, CO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, organických kyselin, vody a tepla. Kompostovací proces a jeho průběh závisí na mikrobiálním složení kompostu, dostupnosti kyslíku, vlhkosti a složení kompostu [41]. Kompostování má oproti pyrolýze několik výhod, zejména je to možnost využít biomasu v libovolném stádiu rozkladu a nezávisle na její vlhkosti. Tento proces navíc probíhá po vytvoření požadovaných podmínek samovolně bez jakýchkoliv energetických vstupů, nevyžaduje neustálou kontrolu, operátora a ani složitou a drahou aparaturu. Oproti výrobě biouhlu je ale příprava kompostu výrazně časově náročnější (výroba biouhlu probíhá v řádu hodin, kompostování probíhá v řádu měsíců až let). V praxi lze kompostovat velkou většinu běžného zahradního odpadu, například trávu, nevyužitelné zbytky hospodářských plodin, nahnilé plody nebo podestýlku hospodářských zvířat [42].

### 2.7.2. Pyrolýza

Pro velkopěstitele, a obzvlášť pro větší závody, zpracovávající organickou hmotu (například továrna, zpracovávající skořápkové plody), může být nejvhodnějším způsobem zpracování nekompostovatelného odpadu právě výroba biouhlu pomocí průmyslového reaktoru, který poskytuje biouhel standardní kvality a velikosti [35]. Vlastnostem tohoto biouhlu lze následně přizpůsobit požadavky na techniku, použitou pro jeho aplikaci. Výroba biouhlu má ale smysl pouze v případě, kdy tento odpad nelze dále využít jiným způsobem [24].

V případě malovýrobců a domácností nemá zakoupení průmyslového reaktoru ekonomický smysl. Pro účely zpracování malých množství organického odpadu je proto vhodnější kompostování a občasné vznikající nekompostovatelný odpad přetvářet na biouhel. Pro tyto účely je vhodné využít improvizované výrobní postupy. V prostředí domácích zahrad bývají nejčastější biomasou, kterou nelze kompostovat, větve po prořezávání stromů a dřevnaté části hospodářských plodin [43].

Výroba biouhlu má v obou případech sloužit jako alternativní zisková varianta zpracování nekompostovatelného odpadu, který by jinak neměl žádnou přidanou hodnotu. Proto se v prostředí domácích zahrad a menších farem nepředpokládá výroba biouhlu např. ze dřevěných pilin, které lze v menších provozech lépe využít jako plnivo do kompostu nebo pro přímé zarytí do půdy [42].



### **2.7.3. Alternativní využití nekompostovatelného odpadu**

V některých situacích může dojít ke vzniku většího množství odpadní biomasy, kterou nejde efektivně kompostovat, ale ani není praktické ji použít pro výrobu biouhlu. V prostředí zahrady jsou takovou biomasou například pařezy, částečně ztrouchnivělé kmeny stromů atd. Tento typ odpadu lze například využít jako základ tzv. Hügelkultury. Hügelkulturou se myslí vyvýšený záhon, ve spodní části tvořený silnou vrstvou dřevitého materiálu, následně překrytý vrstvou listí nebo posečené trávy a nakonec kompostem. Dřevitá část Hügelkultury zadržuje vlhkost a vlivem rozkladných procesů prohřívá záhon, toto teplo následně umožňuje rychlejší růst pěstovaných rostlin [44].

## **2.8. Analýza biouhlu**

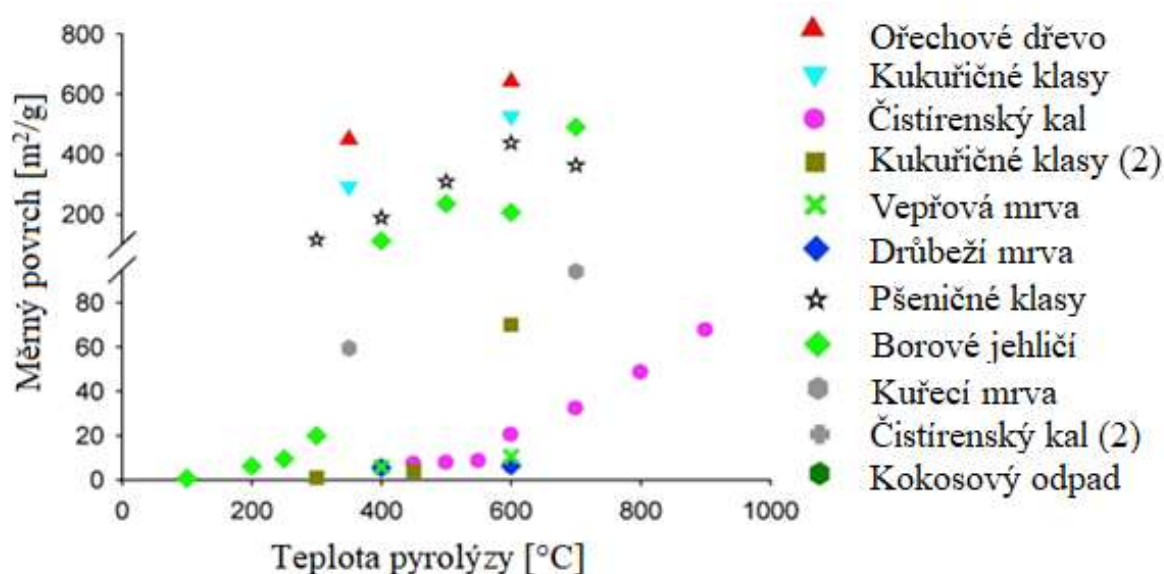
Pro určení kvality vyrobeného biouhlu a jeho konečnou aplikaci je potřeba znát fyzikální, chemické a další vlastnosti připraveného produktu. Cena analýzy úzce souvisí s jeho konečnou aplikací (například pokud je biouhel vyráběn čistě za účelem dlouhodobého uskladnění uhlíku, stačí znát jeho hmotnost a poměr C:O a C:H) a případnou potřebou certifikace produktu. Certifikace EBC přímo určuje povolené analytické metody, které je možné pro analýzu využít.

### **2.8.1. Granulometrie**

V závislosti na způsobu výroby a vstupní biomase může být výsledná velikost vyrobeného biouhlu velmi rozmanitá (od uhlého prachu až po kusy o velikosti několika centimetrů) [35]. Pro většinu aplikací je potřeba tuto velikost standardizovat, za tímto účelem lze využít síta se standardní velikostí ok a případné drcení biouhlu na požadovanou velikost. Z pohledu využití biouhlu pro zvýšení kvality zemědělské půdy je vhodný jemnější materiál o velikosti méně než 2 mm, hrubší frakce (2-20 mm) již nemají významnější vliv na výnosy [45].

### **2.8.2. Analýza povrchu a povrchových vlastností**

Vlastnosti biouhlu jsou úzce spojeny s jeho specifickým povrchem a funkčními skupinami, lokalizovanými na povrchu biouhlu. Specifický povrch se nejčastěji stanovuje metodou BET (Brunauer-Emmet-Teller analysis) pomocí adsorpce plynu na pevný povrch. Pro aplikaci biouhlu v půdě je ale potřeba vědět, zda vyrobený biouhel obsahuje převážně mikropóry nebo makropóry, proto se obvykle také pořizují snímky pomocí skenovací elektronové mikroskopie (SEM). U biouhlů byla pozorována závislosti měrného povrchu na teplotě pyrolýzy, se stoupající teplotou pyrolýzy stoupal měrný povrch (Obrázek 2) [46].



Obrázek 2 – Závislost měrného povrchu na teplotě pyrolýzy různých vstupních biomas. Převzato a upraveno [46]

Chemické složení povrchu biouhlu lze určit např. pomocí infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací (FTIR). Touto metodou lze stanovit především funkční skupiny, které se účastní polárních a nepolárních interakcí mezi biouhlem a různými půdními kontaminanty [11], čímž efektivně snižují mobilitu a biologickou dostupnost mnoha různých kontaminantů, například antrazinu a olova [47]. Využití biouhlu pro vazbu iontů těžkých kovů limituje  $pH_{NN}$  – tzn. pH nulového náboje. Ve vodném prostředí o  $pH > pH_{NN}$  je biouhel nabitý záporně a může proto přitahovat kladně nabité kationty těžkých kovů. V případě, že  $pH < pH_{NN}$ , biouhel je nabitý kladně a není schopen vázat kationty těžkých kovů. Kladně nabitý biouhel ale dokáže vázat například ionty  $HAsO_4^{2-}$  a  $HCrO_4^-$  [46]. Hodnota  $pH_{NN}$ , stejně jako hodnota pH výluhu, roste s teplotou pyrolýzy [48].

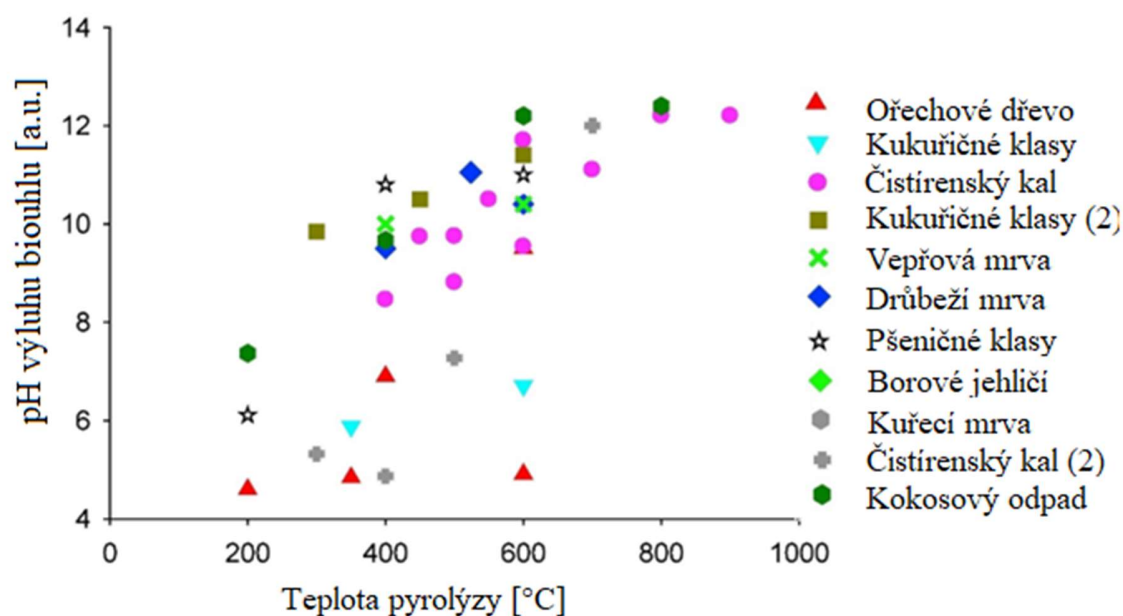
Důležitou vlastností biouhlu, která přímo souvisí s charakterem povrchových skupin, je kapacita výměny kationtů (KVK). KVK lze definovat jako množství kationtů, které je schopen biouhel vázat a na základě interakcí s okolním prostředím uvolňovat. KVK je úzce spojená s teplotou pyrolýzy, se vzrůstající teplotou pyrolýzy KVK klesá, převážně vlivem snížení četnosti povrchových funkčních skupin [49].

### 2.8.3. Stanovení zádržnosti vody

Biouhel může být úspěšně využit pro dlouhodobé zvýšení schopnosti půdy zadržovat vodu. Schopnost zadržovat vodu je úzce spojená s hydrofobicitou povrchu biouhlu a objemem porů biouhlu, vodu převážně zadržují makropóry. Zádržnost vody se obvykle stanovuje gravimetricky jako hmotnostní rozdíl suchého a vodou nasyceného biouhlu, obdobně lze také stanovit zádržnost vody půdou. Biouhel má vyšší vliv na zádržnost vody především v chudších půdách s nízkým obsahem celkového organického uhlíku. V úrodných půdách, bohatých na organický uhlík, vliv zádržnosti vody biouhlem není příliš významný [26].

### 2.8.4. Stanovení pH a vodivosti výluhu

Mezi důležité chemické vlastnosti biouhlu patří pH výluhu, obsah těkavých složek a zastoupení popela. Stanovení pH výluhu je jednoduchá a levná metoda, jejíž podstatou je stanovení pH „roztoku“ biouhlu ve vodě, obdobně lze stanovit pH půdy, do které byl biouhel aplikován. Z pohledu zemědělského využití biouhlu je pH výluhu biouhlu jedním z nejdůležitějších sledovaných parametrů. Přídavkem vhodného množství biouhlu je možné optimalizovat pH půdy směrem do zásadité oblasti, v případě aplikace biouhlu do již bazické půdy naopak znalost pH výluhu umožňuje současným okyselením půdy provést korekci pH do neutrální oblasti. Vlivem zvýšeného využívání syntetických hnojiv navíc dochází k postupnému nežádoucímu okyselení zemědělských půd, které by mohlo být možné zpomalit nebo úplně zastavit vhodnou aplikací biouhlu [50]. Se stoupající teplotou pyrolýzy dochází k postupnému zvyšování pH výluhu biouhlu napříč různými vstupními biomasami (Obrázek 3).



Obrázek 3 – Graf závislosti pH na teplotě pyrolýzy pro různé vstupní biomasy. Převzato a upraveno [46]

Stanovení vodivosti výluhu umožňuje orientačně zjistit zastoupení rozpustných solí v biouhlu. Certifikace EBC sice vyžaduje stanovení vodivosti výluhu biouhlu, ale neudává žádné limitní hodnoty. Z tohoto důvodu se tedy jedná o méně podstatnou, ale přesto užitečnou informaci [2].

### 2.8.5. Prvkové složení

Při aplikaci biouhlu je nutné zabránit kontaminaci zemědělské půdy, nebo výrobků obsahující biouhel, toxickými prvky. Certifikace EBC nařizuje provedení analýzy podrobného prvkového složení biouhlu u všech kategorií, s výjimkou kategorie EBC-Basic. U všech kategorií je ale vyžadováno stanovení C, N, H, O, P, K, Mg, Ca a Fe. [2]. Sledovanými mikroprvky jsou především těžké kovy (Cd, Pb, Hg, As, Ni) a prvky, které se v organismech vyskytují jen ve stopovém

množství, ale ve vysokých koncentracích mohou mít toxické účinky (Zn, Cu, Cr). Nejpřísnější nároky na obsah sledovaných prvků vyžaduje kategorie EBC-Feed, následovaná kategorií EBCAgroBio. Kategorie EBC-Agro, EBC-Urban a EBC-ConsumerMaterials mají shodné limitní hodnoty sledovaných prvků. Limitní hodnoty sledovaných prvků pro jednotlivé kategorie certifikace EBC jsou uvedeny v Tabulce 1.

*Tabulka 1 – Limitní hodnoty obsahu těžkých kovů podle EBC pro jednotlivé kategorie [2]. Převzato a upraveno.*

<b>Prvek</b>	<b>EBC-Feed (mg/kg)</b>	<b>EBC-AgroBio (mg/kg)</b>	<b>EBC-Agro/Urban/ConsumerMaterials (mg/kg)</b>
<b>Pb</b>	10	45	120
<b>Cd</b>	0,8	0,7	1,5
<b>Cu</b>	70	70	100
<b>Ni</b>	25	25	50
<b>Hg</b>	0,1	0,4	1
<b>Zn</b>	200	200	400
<b>Cr</b>	70	70	90
<b>As</b>	2	13	13

#### **2.8.6. Stanovení obsahu PAU**

Podle certifikace EBC je nutné stanovit celkovou koncentraci polycyklických aromatických uhlovodíků (PAU), určených European Food Safety Authority (EFSA) [51]. Povolené hodnoty obsahů PAU v jednotlivých třídách biouhlu jsou uvedeny v Tabulce 2. Sledovanými PAU z pohledu EBC jsou benzo[a]pyren, benzo[a]anthracen, chrysen, benzo[b]fluoranthen, benzo[k]fluoranthene, dibenzo[a,h]anthracen, indeno[1,2,3-cd]pyren, benzo[ghi]perylene. Stanovují se celkové polycyklické aromatické uhlovodíky a konkrétně benzo[e]pyren [2].

Polycyklické sloučeniny jsou všudypřítomné kontaminanty, vznikající zejména nedokonalým spálením organické hmoty. Mnoho PAU má toxické, mutagenní nebo karcinogenní vlastnosti a díky svému vysoce lipofilnímu charakteru se ukládají do tukových tkání [52]. V průběhu produkce biouhlu ale dochází k jejich uvolnění do plynné fáze (pyrolýzních plynů) a často také jejich spálení. Biouhly s velmi nízkými obsahy PAU lze vyrobit i pomocí jednoduchých Kon-Tiki pecí [38].

Tabulka 2 – Limitní hodnoty obsahu PAU v jednotlivých třídách biouhlu [2]. Převzato a upraveno.

<b>Třída biouhlu</b>	<b>EBC-Feed EBC-AgroOrganic</b>	<b>EBC-Agro</b>	<b>EBC-Urban EBC-ConsumerMaterials</b>	<b>EBC-Basic</b>
<b>Σ PAU [mg/kg]</b>	1	1	1	4
<b>Benzo[e]pyren [mg/kg]</b>	1 mg/kg pro všechny kategorie			

### **3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

#### **3.1. Materiál, chemikálie a přístroje**

##### **3.1.1. Materiál**

Odpadní biomasa

##### **3.1.2. Chemikálie**

CaCl<sub>2</sub> bezvodý

Referenční roztoky pro prvkovou analýzu Astasol (Analytika spol s.r.o.)

Destilovaná voda

67 % HNO<sub>3</sub>

30 % H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>

Toluen

##### **3.1.3. Přístroje a vybavení**

Kuchyňský mixer o výkonu motoru 500 W (ETA)

Síto s velikostí ok 15 mm (vlastní výroba)

Plechový sud

Běžné laboratorní sklo a vybavení

Analytické váhy: 224i-1S (Sartorius)

Třepačka: GFL 3006 (NaturTech)

pH metr: pH 3210 (WTW) s elektrodou SenTix® 21 (WTW)

Stříkačkové filtry Chromservis CHS Filterpure 0,45 µm

Filtrační papíry: VWR European 516-0805 5-13 µm

Mikrovlnný rozkladný systém: MLS 1200

Soxhletův extractor

Přístroj pro ICP-OES: Ultima 2 (HORIBA Jobin Yvon)

Přístroj pro BET analýzu: NOVA 2200e (Quantachrome)

Přístroj pro FTIR: Nicolet IS50 (Thermo Fisher Scientific)

Přístroj pro GC-MS: 8890 (Agilent), 7000D triple kvadrupól (Agilent)

Konduktometr: S30 SevenEasy (Mettler Toledo)

## 3.2. Pracovní postup

### 3.2.1. Výroba biouhlu a potřebného vybavení

Pro výrobu biouhlu byla použita odpadní biomasa, jejíž složení pro jednotlivé vzorky je uvedeno v Tabulce 3. Biouhel byl vyroben v částečně zkorodovaném plechovém sudu o objemu 212 litrů, vlivem koroze vzniklo ve spodní části sudu několik otvorů o rozměrech přibližně 2-4×10-15 cm. Metoda výroby biouhlu je popsána v oddíle 2.6.3.



Obrázek 4 - Plechový sud použitý pro výrobu vzorků 1, 2 a 3. Na snímku je příprava vzorku č. 3, v pozadí je vidět síto použité pro oddělení frakce 0-15 mm.

Pro vyřazení příliš velkých kusů biouhlu a nespálené biomasy bylo použito síto o průměru ok 15 mm. Toto síto bylo vyrobeno ze svařovaného ocelového pletiva, vsazeného do dřevěného rámu o rozměrech 50×90 cm. Vyrobený biouhel (vzorky č. 1, 2 a 3) byl přesítován přes síto, frakce o velikosti 0-15 mm byla pomleta v kuchyňském mixéru a použita pro další analýzy.

Vzorky č. 4 a 5 byly odebrány z podzimní a jarní produkce biouhlu na zahradě environmentálního školského zařízení Lipka-Kamenná. Biouhel byl vyroben v tzv. Kon-Tiki peci o objemu 200 litrů, určené pro domácí výrobu biouhlu. Vzorky byly odebrány z hromady produktu z pěti různých míst a v různých hloubkách. Složení vstupní biomasy jednotlivých je uvedeno v Tabulce 3, postup výroby obou vzorků je shodný s postupem výroby vzorků č. 1, 2 a 3 a je uveden v oddíle 2.6.3. Odebrané vzorky byly pomlety v kuchyňském mixéru a použity pro další analýzy.



*Obrázek 5 – Kon-Tiki pec pro domácí výrobu biouhlu, ve kterém byly vyrobeny vzorky č. 4 a 5. Tato pec má tvar převráceného komolého kužele, ve spodní části pece se nachází ventil pro vypuštění přebytku vody z hašení hořící biomasy. Zároveň lze tento ventil použít pro regulaci vstupu vzduchu do pece, čímž lze výrazně urychlit zapalování biomasy.*



Tabulka 3 – Seznam vstupní biomasy jednotlivých vzorků a jejich původ

Vzorek	Vstupní biomasa	Původ vzorku
#1	Směs vlhkých větví ořechového a smrkového dřeva	Vlastní výroba
#2	Suché ořechové dřevo	Vlastní výroba
#3	Směs mokrých větví různých ovocných dřevin	Vlastní výroba
#4	Břečťan, směsný dřevnatý odpad	Lipka – Kamenná
#5	Břečťan, zlatobýl, směsný dřevnatý odpad	Lipka – Kamenná

### 3.2.2. Stanovení pH výluhu

Pro stanovení byla použita metoda dle certifikace EBC. Dvě sady rozmělněných vzorků byly smíchány v hmotnostním poměru 1:5 s 0,01M roztokem  $\text{CaCl}_2$ , suspenze byly míchány na třepačce GFL 3006 (NaturTech) při frekvenci 150 pohybů za minutu po dobu 60 minut. Pomocí pH metru pH 3210 (WTW) s elektrodou SenTix® 21 (WTW) bylo poté stanoveno pH.

### 3.2.3. Stanovení elektrické vodivosti výluhu

Dle certifikace EBC byly dvě sady rozmělněných vzorků smíchány s destilovanou vodou v hmotnostním poměru 1:10, suspenze byly míchány na třepačce GFL 3006 (NaturTech) při frekvenci 150 pohybů za minutu po dobu 60 minut a přefiltrovány přes stříkačkové filtry. Vodivost výluhu byla poté stanovena konduktometrem S30 SevenEasy (Mettler Toledo).

### 3.2.4. Stanovení zádržnosti vody

Pro stanovení schopnosti biouhlu zadržovat vodu byla vypracována metoda, založená na metodě dle certifikace EBC. Na analytických vahách 224i-1S (Sartorius) bylo odváženo 5,000 g vzorku a zalito 20 ml destilované vody. Suspenze byly míchány na třepačce GFL 3006 (NaturTech) při frekvenci 150 pohybů za minutu po dobu 60 minut. Po 24 hodinách byly suspenze přefiltrovány ve filtrační aparatuře přes předem zvážené filtrační papíry (VWR European), po ukončení filtrace byl filtrační koláč spolu s filtrem ponechán ve filtrační nálevce po dobu 120 minut. Následně byl zvážen mokrý filtrační papír spolu s mokrým koláčem, poté byl dokonale vysušen v elektrické sušárně při teplotě 104 °C a po vysušení opět zvážen.

Pro korekci vlivu zádržnosti vody filtračním papírem byl stejný postup opakován s filtračním papírem: Předem zvážený filtrační papír bylo ve filtrační aparatuře přelito 50 ml destilované vody tak, aby došlo k úplnému namočení filtračního papíru. Filtrační papír byl ponechán ve filtrační nálevce po dobu 120 minut. Následně byl zvážen mokrý filtrační papír spolu s mokrým koláčem, poté byl dokonale vysušen v elektrické sušárně při teplotě 104 °C a po vysušení opět zvážen.

### 3.2.5. Prvková analýza

Stanovení obsahu makroprvků (Na, K, Ca, Mg) a mikroprvků (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) bylo provedeno pomocí ICP-OES s využitím mikrovlnného rozkladu mokrou cestou. Bylo odváženo 100 mg vzorků pro stanovení ve dvou sériích, ke každému vzorku byla do rozkladné patrony přidána směs 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a 67% HNO<sub>3</sub> v poměru 1:5. Patrony byly poté umístěny do rozkladného mikrovlnného systému MLS 1200 (Milestone), kde byly rozloženy podle programu, uvedeného v Tabulce 4. Po rozkladu byly kvantitativně převedeny do 25 ml odměrných baněk a doplněny destilovanou vodou po rysku. Pro samotnou analýzu byly vzorky přefiltrovány přes stříkačkové filtry 0,45 μm.

Tabulka 4 – Program mikrovlnného vzorku pro následnou analýzu metodou ICP-OES

Krok	Výkon [W]	Čas [min]
1	250	2
2	0	2
3	250	6
4	400	5
5	600	5

Pro sestavení kalibrační závislosti byly připraveny roztoky o koncentraci 0 mg/l, 10 mg/l, 25 mg/l a 50 mg/l (stanovení makroprvků) a 0 mg/l, 0,25 mg/l, 0,5 mg/l a 1 mg/l. Roztoky pro sestavení kalibrační křivky byly připraveny ředěním směsných standardů Astasol (Analytika spol s.r.o.).

Vzorky byly analyzovány pomocí přístroje Ultima 2 (HORIBA Jobin Yvon) Seznam vlnových délek, při kterých byly stanoveny jednotlivé prvky, je uveden v Tabulce 5 a 6, parametry analýzy jsou vypsány v Tabulce 7.

Tabulka 5 – Seznam stanovených makroprvků a vlnových délek, při kterých byly stanoveny

Prvek	Vlnová délka [nm]
Ca	393,366
K	766,490
Na	588,995
Mg	285,213

Tabulka 6 - Seznam stanovených mikroprvků a vlnových délek, při kterých byly stanoveny

<b>Prvek</b>	<b>Vlnová délka [nm]</b>
<b>Al</b>	396,152
<b>Cd</b>	214,438
<b>Co</b>	228,616
<b>Cr</b>	205,552
<b>Cu</b>	327,396
<b>Fe</b>	259,940
<b>Mn</b>	257,610
<b>Ni</b>	221,647
<b>Pb</b>	220,350
<b>Zn</b>	206,191

Tabulka 7 – Parametry stanovení makroprvků a mikroprvků metodou ICP-OES

	<b>Makroprvky</b>	<b>Mikroprvky</b>
<b>Příkon [W]</b>	1100	1300
<b>Otáčky pumpy [min<sup>-1</sup>]</b>	15	16
<b>Typ zmlžovače</b>	koncentrický, Meinhard	koncentrický, Meinhard
<b>Průtok zmlžovačem [ml·min<sup>-1</sup>]</b>	0,83	0,83
<b>Tlak ve zmlžovači [bar]</b>	2,98	2,98
<b>Typ mlžné komory</b>	cyklonová, radiální	cyklonová, radiální
<b>Mřížka</b>	2400 vrypů	2400 vrypů
<b>Detektor</b>	fotonásobič	fotonásobič
<b>Průtok plazmového plynu [l·min<sup>-1</sup>]</b>	14	14
<b>Průtok pomocného plynu [l·min<sup>-1</sup>]</b>	0,2	0,2
<b>Průtok stínicího plynu [l·min<sup>-1</sup>]</b>	0,8	0,8

### 3.2.6. Stanovení PAU

V souladu s metodikou EBC bylo stanoveno 16 vybraných polycyklických aromatických uhlovodíků. 2,5 g vzorku bylo ve dvou sériích odváženo do extrakční patrony a extrahováno

Soxhletovou extrakcí 100 ml toluenu. Takto extrahované vzorky byly poté destilací zahuštěny na objem přibližně 20 ml a v 25 ml odměrné baňce toluenem doplněny po rysku. Před samotnou analýzou byly vzorky přefiltrovány přes stříkačkové filtry.

Vzorky byly analyzovány metodou GC-MS pomocí přístroje 8890 (Agilent) s detekcí kvadrupólem 7000D triple kvadrupól (Agilent). Stanovovanými PAU byly: hexachloro-2,2',3,4,4',5'-bifenyl, hexachloro-2,2',4,4',5,5'-bifenyl, tetrachloro-2,2',5,5'-bifenyl, pentachloro-2,3,3',5,6-bifenyl, trichloro-2,4,4'-bifenyl, pentachloro-2,3,4,4',5'-bifenyl, 3-methylcholantren, acenaften, acenaften-d10, acenaftalen, akridin, anthracen, benz[a]anthracen, 7,12-dimethylbenz[a]anthracen, benzo[a]pyren, benzo[b]fluoranthren, benzo[ghi]perylene, benzo[k]fluoranthren, benzo[b]thiofen, benzo[e]pyren, benzofuran, bifenyl, karbazol, chryzen-d12, dibenz[ah]anthracen, dibenzofuran, dibenzothiofen, fluoranthren, fluoren, indan, inden, indeno[1,2,3-cd]pyren, indol, isochinolin, naftalen, 1-methylnaften, 2,3,6-trimethylnaftalen, 2,6-dimethylnaftalen, 2-methylnaftalen, naftalen-d8, perylen, perylen-d12, fenanthren, 1-methylfenanthren, fenanthren-d10, fenanthridin, pyren, chinolin, heptachlorobifenyl. Parametry analýzy GC-MS jsou uvedeny v Tabulce 8 a Tabulce 9.

*Tabulka 8 – Parametry GC analýzy*

<b>Inlet</b>	EPC split/splitless
<b>Režim</b>	pulzní, splitless
<b>Tlak pulzní injekce</b>	50 psi za 42 sekund
<b>Čistící tok do split otvoru</b>	50 ml·min <sup>-1</sup> za 45 sekund
<b>Režim průtoku septem</b>	standardní
<b>Objem nástřiku [μl]</b>	1
<b>Teplota inletu [°C]</b>	320
<b>Nosný plyn</b>	He
<b>Inlet liner</b>	4 mm kužel se skleněnou vatou (Agilent)
<b>Kolona 1</b>	DB-EUPAH 0,25 mm × 15 m, 0,25 μm
<b>Režim kontroly kolony 1</b>	Konstantní průtok 0,9557 ml·min <sup>-1</sup>
<b>Spojení inletu kolony 1</b>	split/splitless
<b>Spojení outletu kolony 1</b>	PSD
<b>Kolona 2</b>	DB-EUPAH 0,25 mm × 15 m, 0,25 μm
<b>Režim kontroly kolony 2</b>	konstantní průtok 1,1557 ml·min <sup>-1</sup>
<b>Spojení inletu kolony 2</b>	PUU
<b>Spojení outletu kolony 2</b>	MSD

Tabulka 9 – Parametry kvadrupólu

<b>Zdroj</b>	inertní extraktor
<b>Čočky [mm]</b>	9
<b>Režim</b>	MRM
<b>Schopnost prodlení [min]</b>	4
<b>Režim zisku EM napětí</b>	10
<b>Teplota kvadrupólu [°C]</b>	150
<b>Teplota zdroje [°C]</b>	320
<b>Teplota přenosové dráhy [°C]</b>	320
<b>Průtok vodíku [ml·min<sup>-1</sup>]</b>	0,33

### 3.2.7. FTIR analýza biouhlů

FTIR analýza biouhlů byla provedena pomocí přístroje Nicolet IS50 (ThermoFisher Scientific) s modulem Smart diffusion reflectance. Vzorky byly naředěny vysušeným KBr, každé spektrum bylo vytvořeno z průměru 512 skenů při rozlišení 4.

### 3.2.8. Stanovení měrného povrchu

Měrný povrch byl stanoven pomocí přístroje NOVA 2200e (Quantachrome) standardním postupem BET analýzy. Parametry analýzy jsou uvedeny v Tabulce 10.

Tabulka 10 – Parametry analýzy BET

<b>Teplota odplynění [°C]</b>	300
<b>Čas odplynění [h]</b>	20
<b>Teplota adsorpce [°C]</b>	-195,88
<b>Adsorpční plyn</b>	N <sub>2</sub>
<b>Trvání analýzy [h]</b>	6

## 4. VÝSLEDKY A DISKUZE

### 4.1. Výroba biouhlu

Zadáním této práce bylo připravit biouhel ze směsného rostlinného odpadu se zaměřením na zpětnou aplikaci tohoto biouhlu do zemědělské půdy, ve které byla biomasa vypěstována. Tradiční metodou výroby dřevěného uhlí v Kon-Tiki peci byl pomocí běžného zahradnického vybavení vyroben biouhel o velikosti kusů 0-60 mm. Biouhel byl získán pouze v pevné formě, vznik kapalné frakce nebyl pozorován, to odpovídá charakteru biouhlu, vyrobeného pomalou pyrolýzou za vysokých teplot [53]. Jelikož nebylo možné monitorovat ani regulovat teplotu pyrolýzy, lze předpokládat, že teplota procesu nepřesáhla teplotu volného hoření tvrdých dřev (700-900 °C), v případě spalování smrkového dřeva okolo 600 °C [54].

Vzhledem k tomu, že byla použita biomasa různorodého složení a v některých případech vlhká biomasa, nebylo možné určit výtěžnost produkce. U přesně řízeného procesu pyrolýzy za vysokých teplot lze pyrolýzou jehličnatého dřeva v rozmezí předpokládaných teplot dosáhnout výtěžků přibližně 22 %, obdobných výtěžků lze dosáhnout za uvedených teplot i při použití jiných druhů dřevin [55]. Důležitým poznatkem pro domácí výrobu byla skutečnost, že dlouhé a velké kusy biomasy neprohořely naskrz a jejich pyrolýza proběhla jen částečně (na Obrázku 4 je příklad této biomasy – větev listnatého stromu o délce 120 cm a průměru 9-13 cm). Velké kusy by měly být předem nařezány, nebo využity pro jiné účely (palivové dřevo, Hügelkultura aj.).

V průběhu výroby mohlo dojít k potenciálním ztrátám produktu vlivem nedokonalého řízení procesu pyrolýzy (část biouhlu byla spálena na popel). Z tohoto důvodu byla jedna dávka vyřazena, protože vlivem silného větru došlo ke spálení velké části produktu. Kvůli nedokonalému uhašení dalšího výrobního cyklu rovněž došlo k nepozorovanému spálení vyrobeného biouhlu. Lze tedy říct, že velkým nedostatkem tradičních výrobních metod je nutnost nepřetržitě proces sledovat a zajistit skutečně dokonalé uhašení hořící biomasy.

Pro orientační výpočty výtěžnosti lze vycházet z výtěžnosti, dosažené týmem Liu a kolektiv, tedy 22 % [55]. Vlivem povětrnostních podmínek, nedokonalostí výrobního procesu a použitého vybavení ale bude nevyhnutelně docházet k částečným ztrátám produktu vlivem spálení, proto můžeme očekávat nižší výnosy. Vstupní biomasa má také velmi proměnlivý obsah vlhkosti, z tohoto důvodu by byla vypočítaná výtěžnost ještě nižší (část hmotnosti vstupní biomasy by se odpařila ve formě vodní páry). Domácí výroba biouhlu pro následnou zpětnou aplikaci do půdy ale nevyžaduje znalost přesné výtěžnosti biouhlu, protože lze předpokládat, že malopěstitelé zpracují nárazově všechnu dostupnou odpadní biomasu bez jejího předchozího zvážení.

Vyrobený biouhel je obvykle tvořen kusy většími než 2 mm, pro následnou aplikaci je tedy vhodné jej pomlít [45]. S pomocí malého ručního kuchyňského mixéru bylo možné rychle a efektivně dosáhnout rozmělnění na velikost částic v rozmezí 0-2 mm, v případě potřeby lze přesít pomletý biouhel přes kuchyňské síto a přeřad pomlít znovu.

## 4.2. Stanovení pH výluhu biouhlů

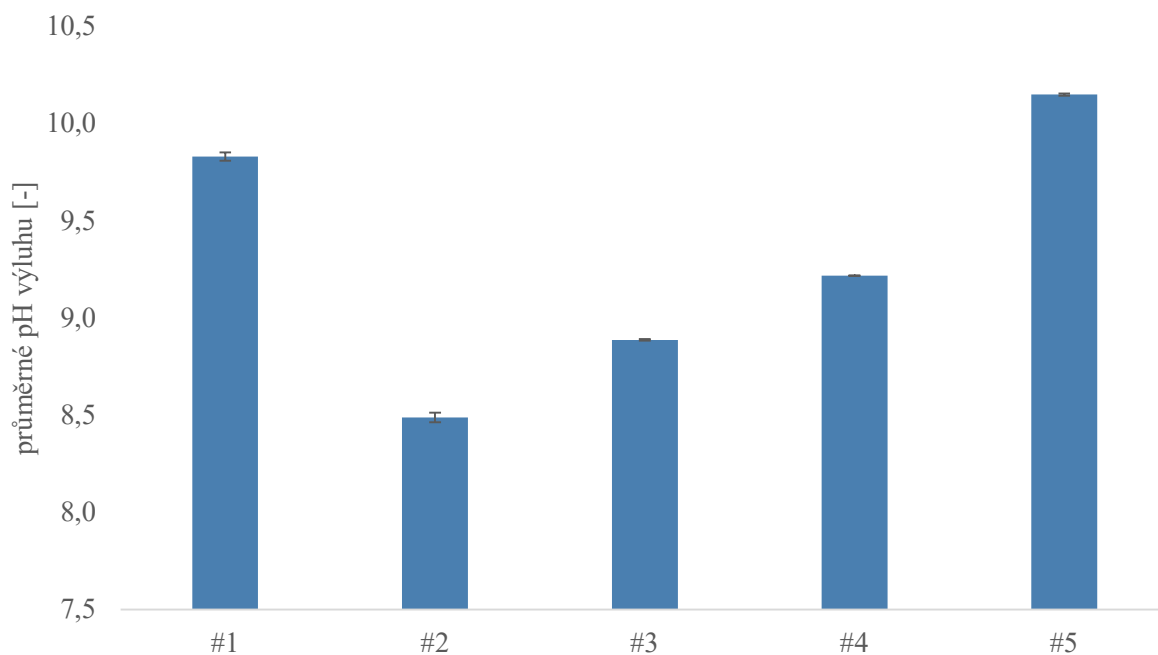
V souladu s metodikou certifikace EBC bylo stanoveno pH výluhu biouhlu. Naměřené hodnoty a směrodatné odchylky pH biouhlů jsou vypsány v Tabulce 11.

*Tabulka 11 – Naměřené hodnoty pH výluhu a jejich směrodatné odchylky*

Vzorek	pH výluhu
#1	9,83 ± 0,02
#2	8,49 ± 0,02
#3	8,889 ± 0,004
#4	9,218 ± 0,001
#5	10,19 ± 0,01

Hodnoty pH výluhů všech biouhlů se pohybovaly v bazické oblasti. Při stejné předpokládané teplotě pomalé pyrolýzy (v oblasti 500-700 °C) naměřil tým Kloss a kolektiv u biouhlu, připraveného pomalou pyrolýzou topolového dřeva při teplotě 525 °C, pH výluhu 8,7. Stejná pracovní skupina také připravila pomalou pyrolýzou při teplotě 525 °C biouhel ze smrkového dřeva, pH výluhu tohoto biouhlu bylo 8,6 [56]. Tým Liu a kolektiv připravil biouhel z dřevěných pilin při teplotě 550 °C, pH výluhu tohoto biouhlu bylo 12,1 [57]. Rozsah naměřeného pH výluhu tedy odpovídá hodnotám, zjištěným jinými skupinami.

Směrodatné odchylky pro jednotlivá stanovení pH výluhu u jednoho vzorku názorně ukazují, že pomletím biouhlů v kuchyňském mixeru došlo k velmi dobré homogenizaci analyzovaného materiálu, což se projevilo na nízkých hodnotách směrodatných odchylek. Tento jev je lépe viditelný v grafické podobě (viz. Obrázek 6). Na základě tohoto poznatku je možné předpokládat, že po homogenizaci pomocí běžného kuchyňského vybavení lze dosáhnout vysoké homogenity mletého biouhlu s velmi podobnými vlastnostmi v celém objemu vyrobeného biouhlu.



Obrázek 6 – Graf průměrných hodnot pH výluhu jednotlivých biouhlů a směrodatných odchylek

Biouhly mají v závislosti na vstupní biomase a podmínkách pyrolýzy velmi široké rozmezí pH. Skupina Ahmad a kolektiv na základě mnoha studií určila rozsah pH výluhů biouhlů z různých vstupních surovin 5,9-12,3, medián i modus pH výluhů biouhlů těchto studií byl 8,7. Průměrná hodnota pH výluhu vzorků v této práci byla 9,31, tato hodnota není příliš vzdálená od mediánu zjištěného skupinou Ahmad a kolektiv [11].

Biouhel bazického charakteru je často využíván v zemědělství, obzvláště v kyselejších půdách. Skupina Jeffery a kolektiv metodou meta-analýzy zjistila průměrné nárůsty výnosů hospodářských plodin o 14 % v kyselejších půdách a o 10 % v neutrálních půdách. Tento efekt byl nejvýraznější u půd hrubozrnných nebo střednězrnných. Zajímavým zjištěním této skupiny byla skutečnost, že přidavek biouhlu do půdy se na výnosech statisticky významně projevil až po zvýšení půdního pH o více než 1,0 jednotek pH. Podle zjištění této skupiny také není statisticky významná závislost mezi zvýšením výnosů a přidavkem biouhlu – dvojnásobná aplikační dávka nepovede ke statisticky významnému zvýšení výnosů [58].

U některých plodin ale může přílišným přidavkem biouhlu dojít naopak ke snížení výnosů. Lori a Biederman ve své meta-analýze uvádějí příklady některých plodin, u kterých byl pozorován limitní práh aplikace biouhlu. Pro tvrdozrnnou pšenici byla limitní dávka  $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (studie skupiny Baronti a kolektiv), po přesáhnutí této koncentrace došlo k poklesu výnosů [59]. V případě quinoi byl tento práh pozorován až v koncentracích přesahujících  $100 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  (studie skupiny Kammann a kolektiv [60]). V případě přihnojované kukuřice (studie týmu Rajkovich a kolektiv) byl tento jev pozorován po přesáhnutí koncentrace 2 hm. %, v případě této studie by se jednalo o ekvivalent  $6,5 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1}$  [61]. Důležitým poznatkem studie Loriho a Biedermana bylo, že typ vstupní biomasy



(skořápky ořechů, dřevěné piliny, chlěvská mrva atd.) způsobovaly až osmkrát větší rozptyl dat oproti rozdílným teplotám pyrolýzy (300-600 °C). Na základě tohoto poznatku lze předpokládat, že při zachování jednotné vstupní biomasy (zahradní odpad, popsáný v kapitole 2.7.2), bude i bez možnosti regulace teploty pyrolýzy rozptyl vlastností vyrobených biouhlů relativně nízký [62].

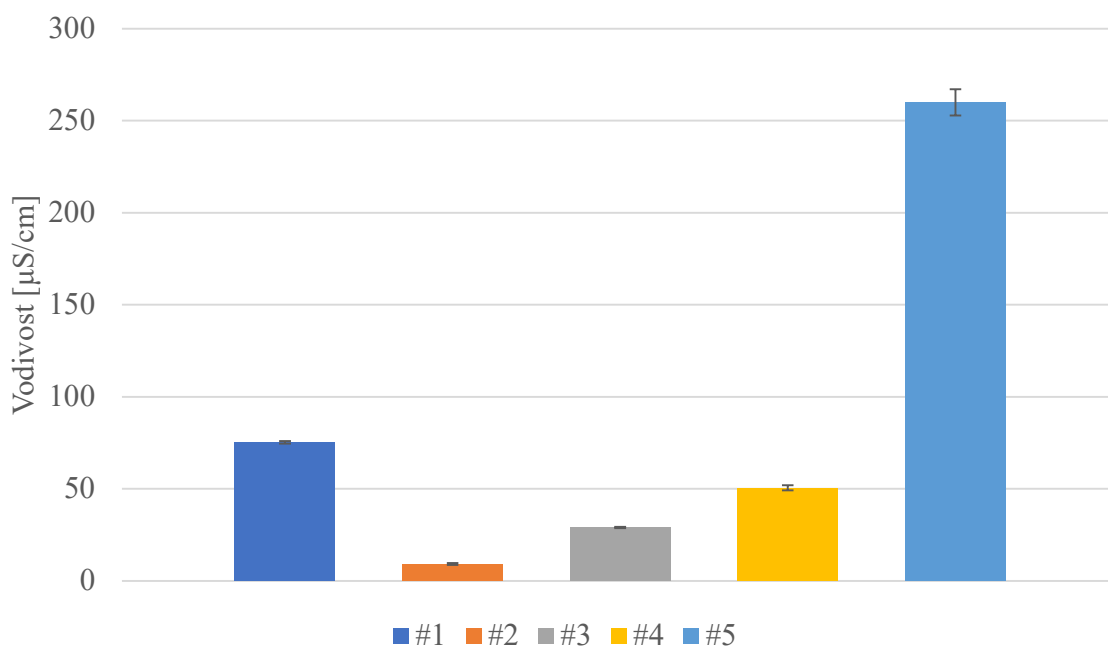
Pro účely použití biouhlu v prostředí domácích zahrad je velmi vhodné provést měření pH půdy, stejně tak lze doporučit domácí stanovení pH výluhu biouhlu, vyrobeného v domácích podmínkách. Postup této analýzy, stanovený EBC, je dostatečně jednoduchý a uskutečnitelný v domácím prostředí. Půdní testy by měla provádět laboratoř s akreditací pro tyto analýzy, ale jednoduché stanovení pH výluhu pomocí běžně dostupných indikátorových pH je možné provést i v domácích podmínkách.

### 4.3. Stanovení vodivosti výluhu

Vodivost výluhu vzorků biouhlů byla stanovena podle postupu, stanoveného certifikací EBC. Vodivost jednotlivých vzorků jsou uvedeny v Tabulce 12 a graficky shrnuty na Obrázku 7.

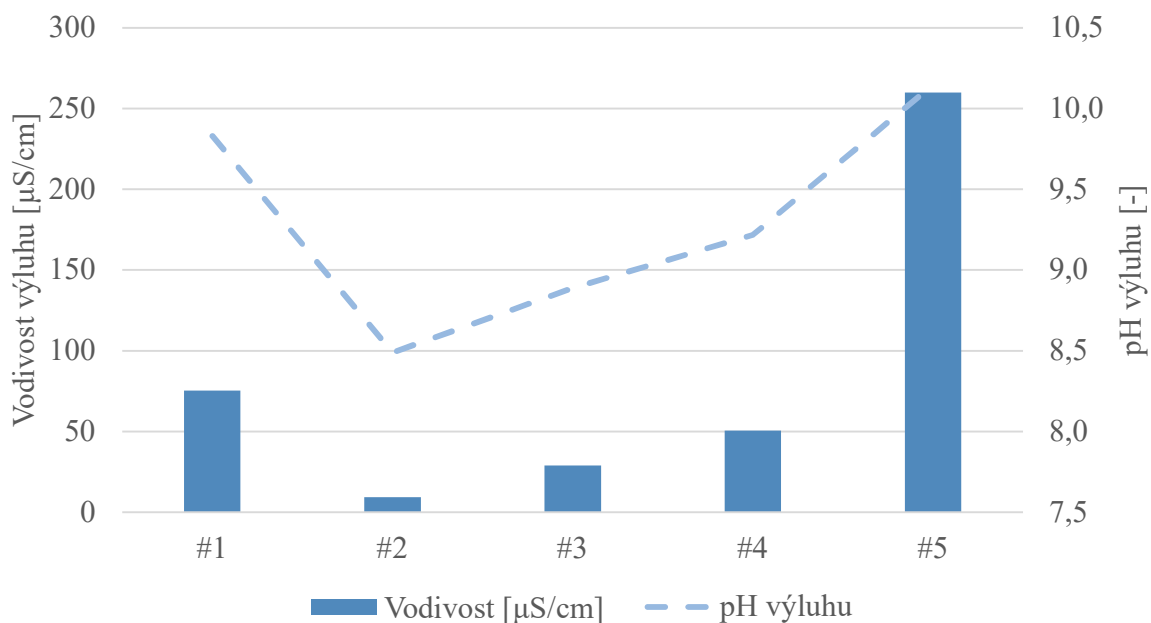
*Tabulka 12 – Naměřené vodivosti biouhlu a příslušné směrodatné odchylky*

<b>Vzorek</b>	<b>Vodivost [<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>]</b>
#1	75,3 $\pm$ 0,6
#2	9,2 $\pm$ 0,5
#3	29,0 $\pm$ 0,2
#4	50,6 $\pm$ 1,3
#5	260 $\pm$ 7



Obrázek 7 – Vodivosti jednotlivých vzorků biouhlu a příslušné směrodatné odchylky

Rozdíly vodivosti výluhu jednotlivých vzorků byly velmi výrazné, nezávisle na způsobu přípravy (pyrolýza v komerční Kon-Tiki peci nebo v sudu), nebo na vstupní biomase. Při srovnání s naměřeným pH výluhu lze ale pozorovat trend, kdy biouhly s vyšší vodivostí výluhu mají rovněž pH tohoto výluhu vyšší. Tato propojenost hodnot pH výluhu a jeho vodivosti je znázorněna na Obrázku 8, korelační koeficient pro tento vztah je 0,843. Rozdíl vlastností výluhů jednotlivých vzorků proto vznikl nejspíš převážně vlivem různých množství vody, použité pro uhašení hořícího biouhlu při výrobě (část popela byla odplavena přebytkem vody, do hasicí vody byla zároveň rozpuštěna část rozpustných složek). Lze předpokládat, že většina rozpustných solí v biouhlu zvyšuje pH výluhu a v případě vysokých hodnot pH výluhu lze ovlivnit pH a iontovou sílu výluhu použitím většího množství hasicí vody. Při pravidelné a dlouhodobé výrobě biouhlu v domácích podmínkách nejspíš bude docházet k vyplavování alkalických solí do půdy, je proto vhodné pro výrobu zvolit místo, kde případné zasolení půdy nebude problémové.



Obrázek 8 – Kombinovaný graf pH a vodivosti výluhů jednotlivých vzorků

Vyšší vodivost výluhu biouhlu souvisí s vyšším obsahem rozpustných solí. Složení výluhu se ale v čase velmi významně mění. Skupina Buecker a kolektiv aplikovala tři druhy biouhlu do zemědělské půdy a porovnávala výluhy půdy, obohacené biouhlem a minerálním hnojivem, po 1 dni od aplikace a po 169 dnech od aplikace. Všechny výluhy, odebrané po 1 dni od aplikace, vykazovaly výrazně vyšší hodnoty vodivosti a koncentrace dusičnanů, dále měly vyšší hodnotu pH a koncentrace fosforečnanů a  $\text{K}^+$ , než výluhy, odebrané po 169 dnech od aplikace. Tento jev byl pozorován v černozemi, písčité půdě a kambisolu. Autoři studie dále pozorovali významný nárůst celkové koncentrace P a K, zvýšení pH výluhu a snížení koncentrace  $\text{NO}_3^-$  ve výluhu po 1 dni od aplikace, ve srovnání s kontrolními vzorky (příhnojená zemina bez přídavku biouhlů). Lze tedy předpokládat, že vlivem interakce biouhlu s půdou a pěstovanými organismy bude s přibývajícím časem od aplikace postupně docházet k poklesu pH a koncentrace solí (dusičnany, fosforečnany aj.) v půdním výluhu a také ke zmenšení výkyvů koncentrací  $\text{NO}_3^-$  díky interakcím biouhlu s hnojivem [63].

Pro správný růst rostlin jsou vlastnosti výluhu půdy vysoce důležité. Výluh půdy musí obsahovat vhodné koncentrace N, P a K v biologicky dostupné formě, dále musí mít správné pH, iontovou sílu a obsahovat dostatečné množství biologicky dostupných forem makrobiogenních a mikrobiogenních prvků. V závislosti na prvkovém složení vstupní biomasy může přídavek biouhlu do půdy zvýšit obsah některých mikrobiogenních prvků. Studie skupiny Kloss a kolektiv ukázala zvýšení obsahu Mo, As, Se a B ve výluhu půdy po přidání biouhlu. Součástí této studie byla i analýza složení hořčice, pěstované na půdě obohacené tímto biouhlem, tyto rostliny obsahovaly ve srovnání s kontrolními vzorky vyšší obsahy Mo a B, ale nižší obsahy Cu a Mn [64].

#### 4.4. Stanovení obsahu vybraných prvků

Metodou ICP-OES byly stanoveny obsahy některých mikroprvků a makroprvků. Naměřené koncentrace včetně příslušných směrodatných odchylek jsou uvedeny v Tabulce 13 a 14. Zastoupení uhlíku v biouhlech z dřevité biomasy, připravené v teplotním rozmezí 500-700 °C, obsahují obvykle 82-94 % C, vodík tvoří obvykle 1-4 % hmotnosti biouhlu. Kyslík je v těchto biouhlech obsažen v rozmezí 2-15 % O a dusík obvykle tvoří 1-4 % hmotnosti biouhlu. Z časových důvodů nebylo možné provést analýzu těchto prvků, ale lze předpokládat podobné hodnoty [11].

*Tabulka 13 – Naměřené hodnoty koncentrací stanovovaných mikroprvků v jednotlivých biouhlech a jejich směrodatné odchylky. Všechny uvedené hodnoty jsou v jednotkách [mg/g], tedy mg daného prvku na 1 g sušiny biouhlu. Zkratka <DL znamená, že v daném vzorku byla koncentrace nižší, než byl detekční limit přístroje.*

Vzorek	#1	#2	#3	#4	#5
<b>Al</b>	0,657±0,052	0,67±0,11	4,2±0,3	4,1±0,6	3,4±0,05
<b>Cd</b>	<DL	<DL	<DL	<DL	<DL
<b>Co</b>	0,005±0,000	0,005±0,000	0,006±0,000	0,006±0,000	0,006±0,000
<b>Cr</b>	0,010±0,001	0,016±0,003	0,013±0,001	0,017±0,002	0,020±0,003
<b>Cu</b>	0,02±0,01	0,011±0,004	0,022±0,005	0,030±0,001	0,039±0,006
<b>Fe</b>	1,41±0,01	1,49±0,11	4,75±0,05	4,3±0,5	4,5±0,5
<b>Mn</b>	0,172±0,003	0,36±0,09	0,19±0,01	0,176±0,007	0,19±0,01
<b>Ni</b>	0,010±0,002	0,006±0,002	0,011±0,003	0,012±0,005	0,019±0,004
<b>Pb</b>	0,004±0,001	0,003±0,003	0,010±0,004	0,014±0,006	0,017±0,000
<b>Zn</b>	0,054±0,003	0,086±0,009	0,050±0,007	0,15±0,01	0,192±0,007

*Tabulka 14 – Naměřené hodnoty koncentrací stanovovaných makroprvků v jednotlivých biouhlech a jejich směrodatné odchylky. Všechny uvedené hodnoty jsou v jednotkách [mg/g], tedy mg daného prvku na 1 g sušiny biouhlu.*

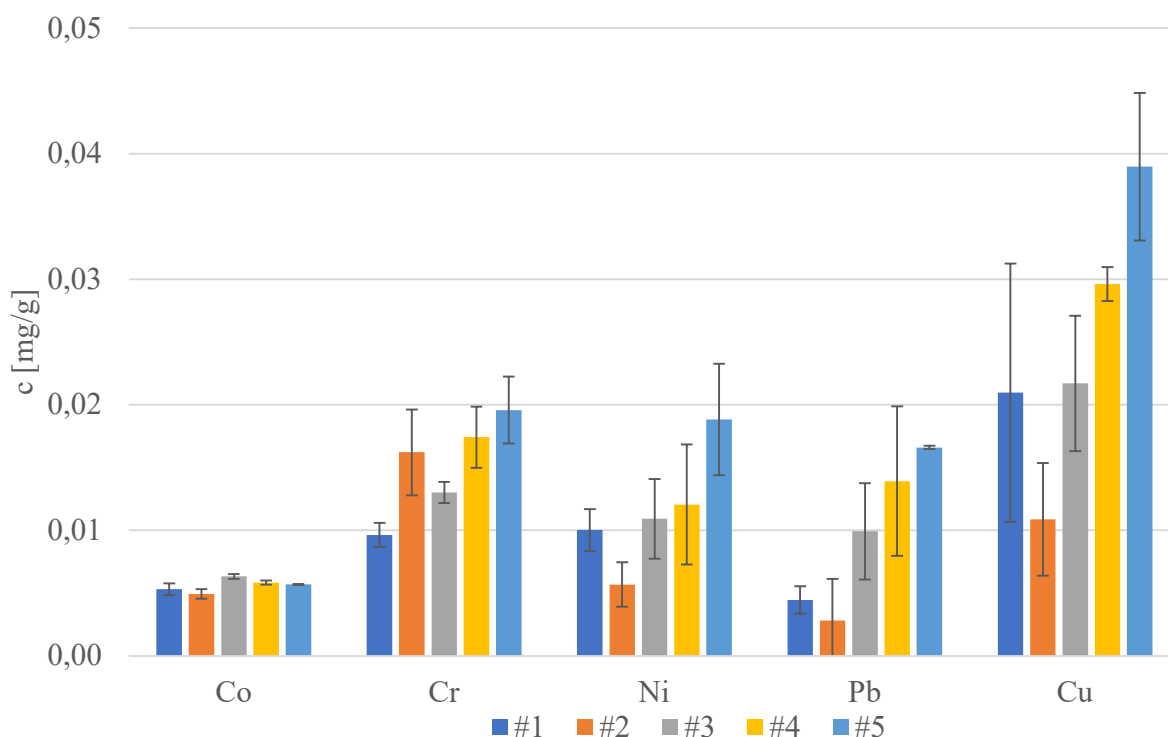
Vzorek	#1	#2	#3	#4	#5
<b>Ca</b>	52,2±1,5	11,2±0,4	36±3	49,8±0,1	79±3
<b>K</b>	12,2±0,4	1,93±0,06	6,0±0,5	13±1	32±2
<b>Mg</b>	6,0±0,2	1,7±0,2	6,3±0,5	6,0±0,2	10,5±0,3
<b>Na</b>	0,7±0,1	0,705±0,002	0,7±0,1	1,2±0,2	1,5±0,4

Nejzastoupenějším prvkem v biouhlech je uhlík, jeho obsah v biouhlech je silně závislý na teplotě pyrolýzy a na vstupní biomase. S rostoucí teplotou pyrolýzy se snižuje zvyšuje poměr N:C a H:C, tedy snižuje zastoupení vodíku a dusíku se současným zvýšením obsahu uhlíku. Příkladem tohoto jevu jsou obsahy N, C a H v biouhlech, připravených za nízkých teplot (51 % C, 6 % H,

42 % O a 0,7 % N u biouhlu, připraveného z borového jehličí při teplotě 100 °C), ve srovnání s biouhlem, vyrobeným ze stejného materiálu pyrolýzou při teplotě 700 °C (87 % C, 1 % H, 11 % O, 1 % N) [65]. Tato závislost je pozorovaná především u dřevnatých typů biomas (borové jehličí a dřevo [65], smrkové dřevo [56]) a u bylinných materiálů (kostřava [15]). Jiné vstupní biomasy ale tento jev v takto významné míře nevykazují – např. drůbeží trus, který měl při teplotě pyrolýzy 350 °C zastoupení prvků 46 % C, 4 % H, 18 %, O a 5 % N, při teplotě pyrolýzy 700 °C bylo složení biouhlu 46 % C, 1 % H, 7 % O a 3 % N [66]. Nezávislost podílu uhlíku na teplotě pyrolýzy vykazuje také čistírenský kal [11].

Ve všech analyzovaných biouhlech byly koncentrace kadmia nižší, než byl detekční limit. Koncentrace olova ve vzorcích #1, #2 a #3 byly nižší, než je limit pro kategorii EBC-Feed (10 mg/kg), vzorky #4 a #5 splňovaly limity pro kategorii EBC-AgroBio (45 mg/kg). Z hlediska obsahu olova jsou tedy všechny vhodné pro zemědělské použití. Všechny vzorky také obsahovaly podlimitní koncentrace niklu pro třídu EBC-Feed (25 mg/kg), proto splňují nejpřísnější limity pro tento prvek. Obsah zinku ve všech vzorcích byl výrazně nižší než limitní koncentrace pro třídu EBC-Feed (200 mg/kg), pouze vzorek #5 je těsně pod touto hranicí. Všechny vzorky rovněž obsahovaly podlimitní koncentrace mědi (70 mg/kg pro kategorii EBC-Feed), stejně tak obsahovaly méně než povolených 70 mg/kg chromu, vyžadovaných pro kategorii EBC-Feed [2].

Z hlediska obsahu stanovovaných prvků splňují vzorky #1, #2 a #3 nejpřísnější limity obsahů Cd, Pb, Ni, Zn, Cu a Cr, jsou proto vhodné pro přímou konzumaci hospodářskými zvířaty. Z důvodu nadlimitního obsahu olova vzorky #4 a #5 pro tento účel nemohou být využity, lze je ale bezpečně použít pro zvýšení kvality zemědělské půdy. Obsahy těchto prvků v jednotlivých vzorcích jsou graficky shrnuty na Obrázku 9.

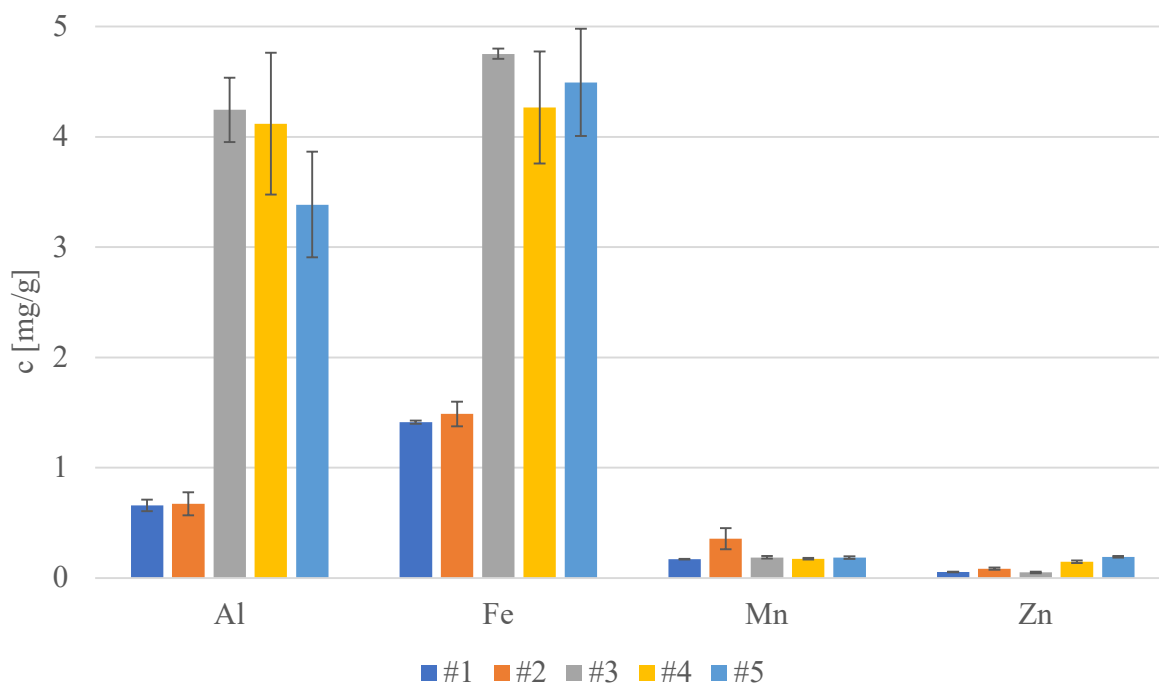


Obrázek 9 – Graf obsahu Co, Cr, Ni, Pb a Cu ve vzorcích biouhlu včetně příslušných směrodatných odchylek

Prvkové složení biouhlů je přímo závislé na prvkovém složení vstupní biomasy, se stoupající teplotou pyrolýzy se vlivem snižování obsahu C, H, O a N současně zvyšuje koncentrace mikroprvků a makroprvků [67]. Tyto prvky jsou biologicky dostupné pouze ve formě iontů, navíc je díky svým vlastnostem biouhel schopen velmi efektivně tyto kationty vázat. Ionty těžkých kovů (Co, Cu, Cr, Pb, Ni) jsou schopné denaturovat enzymy a působí toxicky v akutní i chronické podobě, zároveň se akumulují se ve tkáních organismů [68]. Ve vodném prostředí vlivem kationtové výměny dochází k výměně jejich iontů vázaných na povrchové funkční skupiny biouhlů, vlivem vyšší afinity iontů těžkých kovů k těmto skupinám dochází k uvolňování vázaných iontů alkalických kovů a kovů alkalických zemin. Tento jev sledovala skupina Uchimiya a kolektiv – ve vodě, kontaminované ionty  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  a  $\text{Pb}^{2+}$ , docházelo vlivem kationtové výměny k vytěsnění iontů  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{Mg}^{2+}$ , povrchově vázaných na biouhel, připravený pyrolýzou drůbežního trusu [17]. Z tohoto důvodu je možné předpokládat, že obsažené těžké kovy budou ve formě iontů preferenčně vázané na funkční povrchové skupiny biouhlů. Tato vazba ale bude probíhat pouze v pH vyšším než  $\text{pH}_{\text{NN}}$  daného biouhlu [46].

Z biologického hlediska jsou důležité hodnoty obsahu Al, Mn, Fe a Zn. Hliník se v kyselých půdách s  $\text{pH} < 5$  uvolňuje ve formě  $\text{Al}^{3+}$  a inhibuje růst kořenového systému rostlin.  $\text{Al}^{3+}$  také negativně ovlivňuje metabolismus  $\text{Ca}^{2+}$  a transport vody a živin kořenovým systémem [69]. Z těchto důvodů je nežádoucí zvyšovat koncentraci Al v půdě. Vzhledem k bazickému pH

vyrobených biouhlů ale jeho přidavkem nehrozí okyselení půdy. Zinek je důležitý pro stabilitu ribozomů, tvoří kofaktor RNA-polymeráz a účastní se rostlinných oxidačních procesů. Železo v živých organismech umožňuje tvorbu hemových barviv a spolu s mědí se účastní redoxních reakcí. Mangan je důležitý stopový prvek, který v rostlinách slouží jako kofaktor malátdehydrogenázy, účastní se také fotolýzy vody na fotosystému II [70]. Obsah Al, Mn, Fe a Zn je graficky shrnut na Obrázku 10.

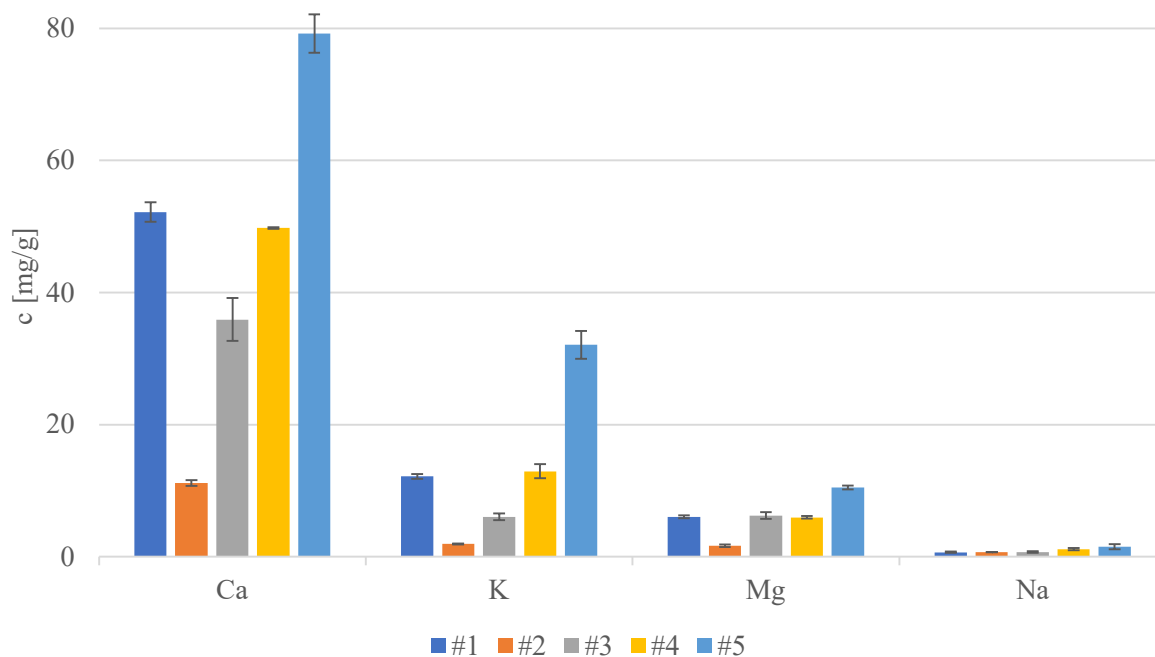


Obrázek 10 – Obsah Al, Fe, Mn a Zn v jednotlivých vzorcích biouhlů včetně příslušných směrodatných odchylek.

Certifikace EBC vyžaduje také stanovení některých makrobiogenních prvků, konkrétně K, Ca a Mg, ale neklade žádné požadavky na minimální nebo maximální obsahy. Z makrobiogenních prvků (makroprvků) proto byly stanoveny K, Na, Ca a Mg. Grafický souhrn obsahů těchto prvků je uveden na Obrázku 11. Ačkoliv je oproti obsahu mikrobiogenních a stopových prvků obsah Na, K, Ca a Mg řádově vyšší, smysluplný přídavek biouhlu (v oblasti do 5 % hm.) nezpůsobí významný nárůst koncentrací těchto prvků. Pro významné zvýšení obsahu vápníku v půdě se obvykle do půdy přidává mletý  $\text{CaCO}_3$ , prvky N, P a K jsou poté přidávány ve formě běžných hnojiv.

Pro domácí výrobu biouhlu je potřeba použít biomasu, která nebyla kontaminována těžkými kovy. Případná mírná kontaminace by ale neměla způsobit pozdější problémy, obzvláště při aplikaci do kyselejších půd, kde nedochází k uvolňování vázaných iontů těžkých kovů [46]. Pro snížení pravděpodobnosti kontaminace půdy těžkými kovy by také neměly být pro výrobu biouhlu využity zbytky stavebního dřeva, natřené barvou nebo lazurou, z důvodu potenciálního obsahu pigmentů na bázi těžkých kovů, především kadmia a arsenu [71; 72]. Podle regulace REACH Evropské unie jsou pro nátěry, prodávané v EU, od roku 2007 velmi nízké limity obsahů těžkých kovů

(As 47 mg/kg, Cd 17 mg/kg, Cr<sup>III</sup> 460 mg/kg, Cr<sup>VI</sup> 0,053 mg/kg, Pb 23 mg/kg a Hg 94 mg/kg) [73]. V praxi ale může být prakticky nemožné určit datum výroby nátěrů, proto je vhodné natírané stavební dřevo ze seznamu možné vstupní biomasy úplně vyřadit. Biouhel, certifikovaný podle metodiky EBC, rovněž nesmí být vyroben z natíraného či jinak povrchově ošetřeného materiálu [2].



Obrázek 11 – Zastoupení Ca, K, Mg a Na v jednotlivých biouhlech včetně příslušných směrodatných odchylek

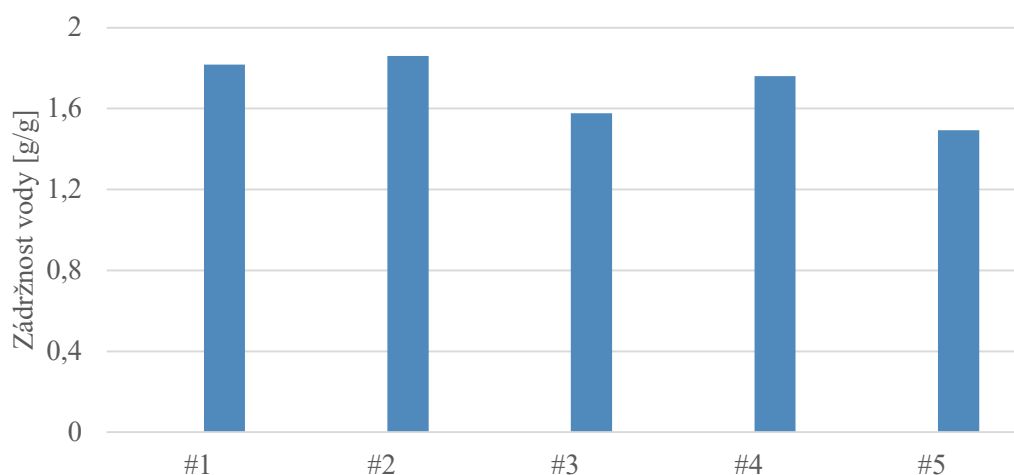
#### 4.5. Stanovení zadržnosti vody biouhlem

Schopnost biouhlu zadržovat vodu byla stanovena upravenou metodou, stanovenou certifikací EBC. Zadržnost vody jednotlivými biouhly je sepsána v Tabulce 15 a graficky shrnuta na Obrázku 12. Průměrná zadržnost vody biouhlů byla  $1,7 \pm 0,2$  gramů H<sub>2</sub>O na 1 gram biouhlu.



Tabulka 15 – Zadržnost vody jednotlivými vzorky biouhlů, hodnoty jsou uvedené v gramech zadržené vody na 1 gram biouhlu.

Vzorek	Zadržnost vody [g/g]
#1	1,82
#2	1,86
#3	1,58
#4	1,76
#5	1,49



Obrázek 12 – Graf zadržnosti vody jednotlivými biouhly

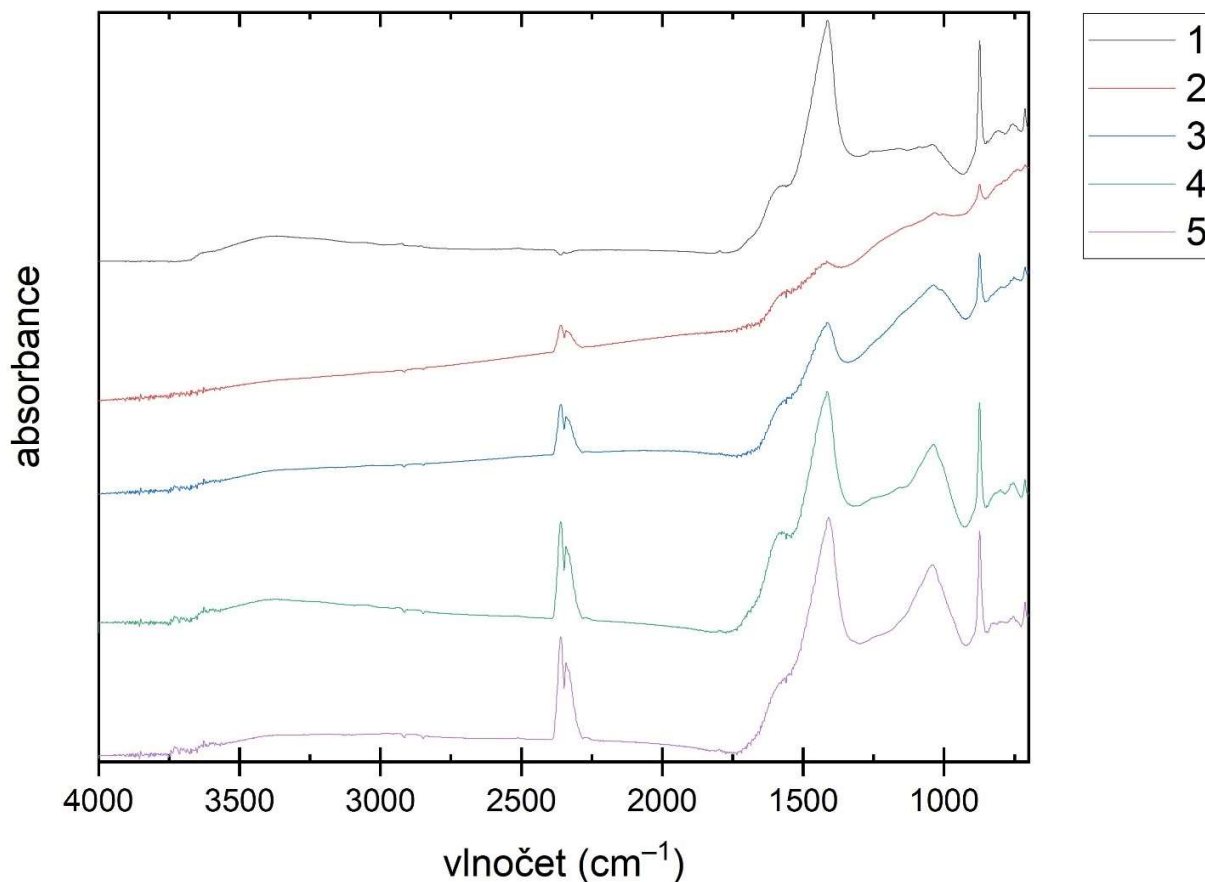
Zadržnost vody je u biouhlů velmi proměnlivá: Skupina Yu a kolektiv připravila biouhel se zadržností vody 2,7 g/g pyrolýzou borového dřeva při teplotě 400 °C. V rámci této studie byla také pozorována lineární závislost zvýšení zadržnosti vody na rostoucím podílu biouhlu v půdě, kdy přídavek 1 hm. % biouhlu do půdy zvýšilo zadržnost vody půdou o 1,7 hm. % (přídavek 1 hm. % biouhlu zvýšilo zadržnost vody půdou z 0,16 g/g na 0,177 g/g). Půda, využitá v této studii, byla písčitého charakteru (35 % jílu, 50 % jemné písky, 15 % hrubozrnné písky) [74]. Podobné výsledky ve své studii uvádí skupina Rehman a kolektiv, která zjistila lineární zvýšení zadržnosti vody o 1,5 hm. % při přídavku 1 hm. % biouhlu, připraveného pomalou pyrolýzou při teplotě 380 a 420 °C ze sušené kravské mrvy [75]. Skupina Adhikari a kolektiv zjistila u 21 různých vzorků zadržnost vody v rozmezí 1-4 g/g, přičemž pozorovala významný vliv zadržování vody nejen uvnitř pórů biouhlu, ale také na jeho povrchu (v případě hydrofobních biouhlů tento jev pozorován nebyl) [76].

Schopnost rychle absorbovat vodu a poté ji pomalu uvolňovat je klíčová pro záchyt vody z přívalových dešťů nebo z intenzivní zálivky, pro zvýšení půdní zádržnosti vody lze proto úspěšně využít přídavek biouhlu. Zajímavé zjištění učinila skupina Werdin a kolektiv, kdy zádržnost vody biouhlem je do jisté míry závislá na hustotě dřeva, které tvoří vstupní biomasu. Tvrdší dřeva s vyšší hustotou mají totiž užší póry a silnější buněčné stěny, biouhel připravený z tohoto typu biomasy má poté menší makropóry [77]. Podle výzkumu skupiny Liu a kolektiv se na zadržování živin v půdě nejvíce podílí mikropóry o velikosti 0,002-0,01  $\mu\text{m}$ , zatímco zádržnost vody nejvíce ovlivňují makropóry o velikosti 0,1-10  $\mu\text{m}$ , Zádržnost vody proto nebyla závislá na měrném povrchu biouhlu [78].

Biouhel lze také použít pro významné zvýšení účinků běžných hnojiv, kdy směs biouhel-hnojivo je schopná i v nižší koncentraci docílit vyšších výnosů než přídavek většího množství hnojiv vlivem zadržení a následného postupného uvolnění zadržovaných rozpuštěných hnojiv. Tento efekt pozorovala skupina Farrar a kolektiv při pěstebních pokusech na zázvoru – rostliny, přihnojené směsí biouhel-hnojivo v dávce 3  $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ , měly přibližně stejné výnosy jako rostliny, přihnojené identickým hnojivem v dávce 5  $\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$  (bez přidání biouhlu) [79]. Ke stejnému závěru došla i skupina Tian a kolektiv, která pomocí kombinace biouhel-hnojivo získala stejné výnosy zázvoru i po snížení aplikační dávky hnojiva o 36 % (ve srovnání s referenční koncentrací hnojiva, se kterou bylo dosaženo srovnatelného výnosu). Z tohoto vyplývá, že kombinace biouhel-hnojivo umožňuje dosáhnout stejných výnosů s nižšími dávkami hnojiv [80]. Obsah živin v půdě se ale v zemědělských půdách vlivem růstu rostlin postupně snižuje. Skupina Farrar a kolektiv ve své další studii zkoumala dlouhodobý efekt přídavku směsi biouhel-hnojivo se zjištěním, že ve druhém roce po přidání této směsi dochází ke snížení výnosů hospodářských hnojiv, především z důvodu vyčerpání N a P. Proto je vhodné druhý rok po aplikaci směsi biouhel-hnojivo provést další přihnojení půdy a doplnit tak vyčerpaný N a P [81].

#### **4.6. FTIR analýza povrchu**

Povrch biouhlů byl analyzován pomocí infračervené spektroskopie s Fourierovou transformací podle postupu, uvedeného v kapitole 3.2.7. Spektra jednotlivých vzorků jsou shrnuta na Obrázku 13.



Obrázek 13 – FTIR spektra vyrobených biouhlů

Z pohledu analýzy biouhlu lze rozeznat několik významných oblastí (pásů). V oblasti okolo  $3640\text{ cm}^{-1}$  se nachází oblast, ve které absorbují hydroxylové skupiny. V oblasti okolo  $2920\text{ cm}^{-1}$  se nachází pásmo absorpce alifatickými skupinami, aromatické uhlovodíky poté absorbují okolo  $3050\text{ cm}^{-1}$ . Karboxylové skupiny, ketony, estery, anhydridy a amidy souhrnně absorbují v široké oblasti okolo  $1744\text{ cm}^{-1}$ . V oblasti okolo  $1605\text{ cm}^{-1}$  absorbují dvojně vazby  $\text{C}=\text{C}$  [82].

Ze spekter jednotlivých biouhlů lze říct, že vzhledem k téměř rovinnému charakteru v oblasti okolo  $3640\text{ cm}^{-1}$  jsou hydroxylové skupiny v jednotlivých vzorcích zastoupeny jen minimálně, to také slouží jako pomocný ukazatel nízkého zastoupení kyslíku v biouhlu. V oblasti vlnočtu  $2920\text{ cm}^{-1}$  je také charakter jednotlivých spekter planární, proto lze předpokládat, že alifatické skupiny v biouhlu téměř nejsou obsaženy. První významný pík se nachází v oblasti  $2350\text{--}2250\text{ cm}^{-1}$ , což odpovídá absorpci nitrilových skupin a alkynů. Lze proto předpokládat zastoupení těchto vazeb a funkčních skupin v připravených biouhlech. V oblasti okolo vlnočtu  $1744\text{ cm}^{-1}$  je ve spektrech viditelný pokles absorbance, proto je možné předpokládat nízké zastoupení karboxylových skupin, ketonů, esterů, anhydridů a amidů. V oblasti okolo  $1605\text{ cm}^{-1}$  je ve spektrech všech vzorků viditelný širší pás, ukazující na přítomnost dvojných vazeb  $\text{-C}=\text{C-}$  [83]. Spektra připravených biouhlů jsou podobná se spektry biouhlu, připraveného z javorového dřeva týmem Cole a kolektiv.

Studie této skupiny mimo jiné prokázala, že FTIR spektrum biouhlu se po aplikaci do půdy mění, především vlivem reakcí půdy a biouhlu. Změny FTIR spektra se projevily především v oblasti okolo  $3400\text{ cm}^{-1}$ , tj. v pásmu absorpce energie hydroxylovými skupinami [84].

#### 4.7. Stanovení měrného povrchu

BET sorpční analýzou byly stanoveny měrné povrchy jednotlivých vzorků biouhlu. Zjištěné měrné povrchy a jejich směrodatné odchylky jsou uvedeny v Tabulce 16.

Tabulka 16 – Stanovené měrné povrchy vzorků biouhlu a příslušné směrodatné odchylky

Vzorek	Měrný povrch [ $\text{m}^2/\text{g}$ ]
#1	$160,8 \pm 0,7$
#2	$404 \pm 12$
#3	$257 \pm 10$
#4	$77 \pm 70$
#5	$95 \pm 2$

Povrchová plocha a s ní spojený objem pórů je spojený s teplotou pyrolýzy a se vstupní biomasou. Chen a kolektiv pozoroval u biouhlů, připravených z borového jehličí, zvyšování povrchové plochy v souvislosti se zvyšováním teploty pyrolýzy ( $0,7\text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  u biouhlu, vyrobeného při teplotě  $100\text{ °C}$ ,  $112,4\text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  v případě biouhlu, připraveném při teplotě  $400\text{ °C}$  a  $490,8\text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  u biouhlu, pyrolyzovaném při teplotě  $700\text{ °C}$ ). Stejný trend byl pozorován i u objemu pórů – objem pórů biouhlu, připravovaném při teplotě  $700\text{ °C}$ , byl více než čtyřnásobný oproti objemu póru biouhlů, vyrobeném při teplotě  $400\text{ °C}$  [65]. Průměrný měrný povrch připravených biouhlů byl  $198\text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ , tato hodnota je velmi blízká hodnotě měrného povrchu biouhlu, vyrobeného při teplotě  $700\text{ °C}$  z pomerančových slupek (tým Chen a Chen [85]) nebo biouhlu, vyrobeného při teplotě  $600\text{ °C}$  z borového jehličí (tým Chen a kolektiv [65]).

Jednotlivé připravené vzorky se svým měrným povrchem velmi lišily. Oba vzorky, odebrané z biouhlů, vyrobených na pracovišti Lipka-Kamenná, měly nižší měrný povrch než vzorky vyrobené pyrolýzou biomasy v dřevěném plechovém sudu. Tento jev by mohl být způsoben vyšší teplotou pyrolýzy v dřevěném plechovém sudu – teplota hoření stoupá se stoupající koncentrací kyslíku a díry ve spodní části sudu zlepšovaly přístup kyslíku do hořící směsi. Z naměřených hodnot není možné určit poměr zastoupení mikropórů a makropórů. Vzhledem k podobným hodnotám zádržnosti vody lze předpokládat, že zastoupení makropórů v jednotlivých vzorcích bude podobné (tyto póry se nejvíce podílí na zadržování vody a vzorky měly podobnou zádržnost vody), vyšší měrný povrch pak bude způsoben dodatečným vznikem dalších pórů, převážně v podobě mikropórů. Tento předpoklad ale vyvrací zjištění týmu Chen a kolektiv, kde objem pórů biouhlu, vyrobeného z borového jehličí při teplotě  $700\text{ °C}$ , byl  $0,186\text{ cm}^3/\text{g}$ , zatímco v případě pyrolýzy při teplotě  $500\text{ °C}$  byl  $0,095\text{ cm}^3/\text{g}$ , při zvýšení teploty pyrolýzy o  $200\text{ °C}$  se zvedl objem pórů téměř dvojnásobně [65].

#### 4.8. Stanovení PAU

Ve vzorcích byly stanoveny vybrané polycyklické aromatické uhlovodíky podle metody EBC. Koncentrace jednotlivých PAU a příslušné směrodatné odchylky jsou uvedeny v Tabulce 17 pro vzorky #1, 2 a #3 a Tabulce 18 pro vzorky #4 a #5, v obou tabulkách jsou také uvedeny celkové obsahy PAU v jednotlivých vzorcích.

*Tabulka 17 – Koncentrace stanovovaných PAU včetně příslušných směrodatných odchylek, celkové obsahy PAU v jednotlivých vzorcích a celkové obsahy PAU, jejichž stanovení vyžaduje EFSA. Zkratka <DL znamená, že obsah daného PAU byl nižší než detekční limit přístroje.*

PAU	Obsah PAU [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ ]		
	#1	#2	#3
<b>Hexachloro-2,2',3,4,4',5'-bifenyl</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Hexachloro-2,2',4,4',5,5'-bifenyl</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Tetrachloro-2,2',5,5'-bifenyl</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Pentachloro-2,3,3',5,6-bifenyl</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Trichloro-2,4,4'-bifenyl</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Pentachloro-2,3,4,4',5-bifenyl</b>	<DL	<DL	<DL
<b>3-methylcholantren</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Acenaften</b>	17 $\pm$ 3	9,49 $\pm$ 0,01	9,4 $\pm$ 0,8
<b>Acetnaften-d10</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Acenaftylen</b>	14,6 $\pm$ 0,6	8 $\pm$ 2	6 $\pm$ 1
<b>Akridin</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Anthracen</b>	34 $\pm$ 6	8,8 $\pm$ 0,2	20 $\pm$ 3
<b>Benz[a]anthracen</b>	22 $\pm$ 5	13,3 $\pm$ 0,3	14,0 $\pm$ 0,1
<b>7,12-dimethylbenz[a]anthracen</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Benzo[a]pyren</b>	23 $\pm$ 3	<DL	<DL
<b>Benzo[b]fluoranthen</b>	161 $\pm$ 1	<DL	<DL
<b>Benzo[ghi]perylen</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Benzo[k]fluoranthen</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Benzo[b]thiofen</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Benzo[e]pyren</b>	18 $\pm$ 2	<DL	<DL
<b>Benzofuran</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Bifenyl</b>	73 $\pm$ 14	<DL	42 $\pm$ 1
<b>Karbazol</b>	247,3 $\pm$ 0,6	<DL	<DL
<b>Chrysen</b>	17 $\pm$ 4	8,0 $\pm$ 0,8	8,5 $\pm$ 0,1
<b>Chrysen-d12</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Dibenz[ah]anthracen</b>	<DL	<DL	<DL
<b>Dibenzofuran</b>	<DL	<DL	<DL

PAU	Obsah PAU [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ ]		
	#3	#4	#5
Dibenzothiofen	<DL	<DL	<DL
Fluoranthen	91 $\pm$ 8	65 $\pm$ 3	69 $\pm$ 1
Fluoren	40 $\pm$ 6	11 $\pm$ 1	16 $\pm$ 1
Indan	<DL	<DL	<DL
Inden	<DL	<DL	<DL
Indeno[1,2,3-cd]pyren	<DL	<DL	<DL
Indol	100 $\pm$ 1	96,7 $\pm$ 0,7	96,6 $\pm$ 0,8
Isochinolin	<DL	<DL	<DL
Naftalen	1050 $\pm$ 150	1538 $\pm$ 33	1570 $\pm$ 140
1-methylnaftalen	150 $\pm$ 26	132 $\pm$ 6	148 $\pm$ 20
2,3,6-trimethylnaftalen	13,4 $\pm$ 0,6	8,89 $\pm$ 0,01	9,0 $\pm$ 0,1
2,6-dimethylnaftalen	69 $\pm$ 12	28,4 $\pm$ 0,4	34 $\pm$ 2
2-methylnaftalen	390 $\pm$ 76	416 $\pm$ 5	440 $\pm$ 16
Naftalen-d8	<DL	<DL	<DL
Perylen	13,1 $\pm$ 0,2	<DL	<DL
Perylen-d12	<DL	<DL	<DL
Fenanthren	118 $\pm$ 23	63 $\pm$ 3	77 $\pm$ 2
1-methylfenanthren	21 $\pm$ 3	17,6 $\pm$ 0,9	12,5 $\pm$ 0,4
Fenanthren-d10	<DL	<DL	<DL
Fenantridin	<DL	<DL	<DL
Pyren	48 $\pm$ 11	18 $\pm$ 3	18 $\pm$ 3
Chinolin	<DL	<DL	<DL
Heptachlorobifenyl	<DL	<DL	<DL
$\Sigma$ PAU	2700 $\pm$ 360	2400 $\pm$ 60	2600 $\pm$ 200
$\Sigma$ PAU dle EFSA	223 $\pm$ 13	21 $\pm$ 1	22,5 $\pm$ 0,1

Tabulka 18 – Koncentrace stanovovaných PAU včetně příslušných směrodatných odchylek, celkové obsahy PAU v jednotlivých vzorcích a celkové obsahy PAU, jejichž stanovení vyžaduje EFSA. Zkratka <DL znamená, že obsah daného PAU byl nižší než detekční limit přístroje.

PAU	Obsah PAU [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ ]	
	#4	#5
Hexachloro-2,2',3,4,4',5'-bifenyl	<DL	<DL
Hexachloro-2,2',4,4',5,5'-bifenyl	<DL	<DL
Tetrachloro-2,2',5,5'-bifenyl	<DL	<DL
Pentachloro-2,3,3',5,6-bifenyl	<DL	<DL
Trichloro-2,4,4'-bifenyl	<DL	<DL
Pentachloro-2,3,4,4',5-bifenyl	<DL	<DL
3-methylcholantren	<DL	<DL
Acenaften	40 $\pm$ 5	18 $\pm$ 5
Acetnaften-d10	<DL	<DL
Acenaftylen	14 $\pm$ 1	<DL
Akridin	<DL	<DL
Anthracen	317 $\pm$ 28	71 $\pm$ 30
Benz[a]anthracen	750 $\pm$ 180	83 $\pm$ 24
7,12-dimethylbenz[a]anthracen	<DL	<DL
Benzo[a]pyren	590 $\pm$ 160	52 $\pm$ 15
Benzo[b]fluoranthen	540 $\pm$ 80	184 $\pm$ 8
Benzo[ghi]perylen	520 $\pm$ 90	169 $\pm$ 6
Benzo[k]fluoranthen	280 $\pm$ 40	103 $\pm$ 5
Benzo[b]thiofen	<DL	<DL
Benzo[e]pyren	370 $\pm$ 90	43 $\pm$ 11
Benzofuran	<DL	<DL
Bifenyl	86 $\pm$ 5	72 $\pm$ 16
Karbazol	425 $\pm$ 25	280 $\pm$ 10
Chrysen	620 $\pm$ 140	70 $\pm$ 19
Chrysen-d12	<DL	<DL
Dibenz[ah]anthracen	270 $\pm$ 22	<DL
Dibenzofuran	<DL	<DL
Dibenzothiofen	<DL	<DL
Fluoranthen	1550 $\pm$ 180	268 $\pm$ 80
Fluoren	97 $\pm$ 10	46 $\pm$ 12
Indan	<DL	<DL
Inden	<DL	<DL
Indeno[1,2,3-cd]pyren	470 $\pm$ 77	196 $\pm$ 4

PAU	Obsah PAU [ $\mu\text{g}/\text{kg}$ ]	
	#4	#5
<b>Indol</b>	102 $\pm$ 4	126 $\pm$ 6
<b>Isochinolin</b>	<DL	88 $\pm$ 6
<b>Naftalen</b>	587 $\pm$ 1	550 $\pm$ 130
<b>1-methylnaftalen</b>	129 $\pm$ 9	94 $\pm$ 23
<b>2,3,6-trimethylnaftalen</b>	20 $\pm$ 1	14 $\pm$ 2
<b>2,6-dimethylnaftalen</b>	91 $\pm$ 9	60 $\pm$ 16
<b>2-methylnaftalen</b>	338 $\pm$ 17	250 $\pm$ 60
<b>Naftalen-d8</b>	<DL	<DL
<b>Perylen</b>	140 $\pm$ 30	21 $\pm$ 3
<b>Perylen-d12</b>	<DL	<DL
<b>Fenanthren</b>	1180 $\pm$ 90	260 $\pm$ 110
<b>1-methylfenanthren</b>	109 $\pm$ 9	32 $\pm$ 6
<b>Fenanthren-d10</b>	<DL	<DL
<b>Fenantridin</b>	<DL	<DL
<b>Pyren</b>	1100 $\pm$ 100	160 $\pm$ 60
<b>Chinolin</b>	<DL	<DL
<b>Heptachlorobifenyl</b>	<DL	<DL
<b><math>\Sigma</math> PAU</b>	10800 $\pm$ 1400	3300 $\pm$ 670
<b><math>\Sigma</math> PAU dle EFSA</b>	4000 $\pm$ 780	860 $\pm$ 80

Koncentrace PAU se v jednotlivých vzorcích poměrně významně lišily. Všechny vzorky, vyrobené v plechovém sudu, měly velmi podobné celkové obsahy PAU, jejich koncentrace byly zároveň nižší než koncentrace PAU v biouhlech, vyrobených pomocí Kon-Tiki pece. Mezi nejvíce zastoupené PAU ve vzorcích patřil naftalen, 1-methylnaftalen, 2-methylnaftalen a karbazol, v případě vzorku #4 dále také pyren, fenanthren, fluoranthen, chryzen, benz[a]anthracen, benzo[a]pyren, benzo[b]fluoranthen a benzo[ghi]perylene. Celkově nejvíce zastoupeným PAU byl naftalen.

Vzorky #1, #2, #3 a #5 obsahují podlimitní obsah PAU, sledovaných EFSA, tj. 1 mg/kg a z pohledu obsahů PAU splňují kritéria pro využití v krmivech pro hospodářská zvířata. Koncentrace celkových PAU ve vzorku #4 leží nad hranicí maximální přípustné koncentrace celkových PAU, sledovaných EFSA (4 mg/kg pro třídu EBC-Basic), z tohoto důvodu není vhodný pro jakékoliv průmyslové využití.

V půdě po aplikaci biouhlu obvykle dochází ke snížení koncentrace biologicky dostupných PAU [86]. Biologická dostupnost PAU, obsažených v biouhlu, je navíc oproti jiným zdrojům PAU (hnojiva, kompost aj.) velmi nízká [87]. Samotná dokumentace pro certifikaci EBC uvádí, že limitní hodnoty 1 mg/kg pro EBC-Feed/AgroOrganic/Agro/ConsumerMaterials/Urban a 4 mg/kg



pro EBC-Basic jsou spíše formální a v budoucnu se možná zvýší [2]. Podle rozhodnutí Evropského parlamentu od roku 2019 mohou hnojiva obsahovat až 6 mg/kg PAU, podle této nové normy splňují všechny biouhly limity obsahu PAU [88]. Vysoké koncentrace PAU v biouhlu mohou být nebezpečné zejména v biouhlech, určených pro výrobu krmiv – skupina Hilber a kolektiv zjistila u biouhlů s vysokými hodnotami celkových PAU (více než 60 mg/kg) až 56% vstřebání těchto PAU v trávicím traktu krav, ale u biouhlů, které obsahovaly méně než 10 mg/kg celkových PAU, nebyly pozorovány žádné negativní jevy [87].

## 5. ZÁVĚR

Cílem této práce bylo vyrobit biouhel z běžného směsného rostlinného odpadu, analyzovat vyrobený biouhel a porovnat vlastnosti vyrobeného biouhlu s parametry, vyžadovanými certifikací Evropského biouhelného certifikátu. Pomocí běžně dostupného vybavení byl úspěšně připraven zuhelnatělý materiál, jehož FTIR spektra odpovídala biouhlu, připravenému z javorového dřeva pomalou pyrolýzou při teplotě 450 °C. Z tohoto důvodu lze předpokládat, že byl úspěšně připraven biouhel, tento předpoklad podporuje velmi nízký obsah alifatických funkčních skupin a vysoký obsah dvojných vazeb.

Hodnoty pH výluhu všech biouhlů se pohybovaly v bazické oblasti v rozmezí 8,5-10,2 a byly srovnatelné s vlastnostmi biouhlu, připraveného z topolového a smrkového dřeva při teplotě 525 °C. Vodivost výluhu jednotlivých vzorků korelovala s hodnotou pH výluhu – vyšší vodivost výluhu měly vzorky s vyšším pH výluhu. Z hlediska obsahu stanovovaných prvků splňují vzorky #1, #2 a #3 limity obsahů Cd, Pb, Ni, Zn, Cu a Cr pro kategorii EBC-Feed, vzorky #4 a #5 z důvodu nadlimitního obsahu Pb splňují limity obsahu sledovaných prvků pro kategorii EBC-AgroOrganic. Specifické povrchy biouhlu byly velmi rozdílné, průměrná hodnota měrného povrchu všech vzorků byla srovnatelná s měrným povrchem biouhlu, vyrobeného z borového jehličí nebo pomerančových slupek při teplotách nad 600 °C.

Vzorky #1, #2, #3 a #5 splňují limity obsahu PAU, sledovaných EFSA, pro kategorii EBC-Feed, z důvodu nadlimitních obsahů PAU vzorek #4 dle certifikace EBC nevyhovuje pro jakékoliv průmyslové využití, ale splňuje limitní hodnoty Evropské unie pro hnojiva. Zadržnost vody biouhlů se pohybovala v rozmezí 1,49-1,84 g/g, ve srovnání se zadržností vody biouhlem, připraveném z borového dřeva při teplotě 400 °C, je tato hodnota poměrně nízká. Na základě výsledků všech analýz lze doporučit domácí výrobu biouhlu a jeho aplikaci do zemědělské půdy.

## 6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *Ithaka institute* [online]. Arbaz, Switzerland: Ithaka institute, 2009 [cit. 2023-05-11]. Dostupné z: <https://www.ithaka-institut.org/en/home>
- [2] Guidelines of European Biochar Certificate - Version 10.1. In: *European Biochar Certification* [online]. [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: [https://european-biochar.org/media/doc/2/version\\_en\\_10\\_1.pdf](https://european-biochar.org/media/doc/2/version_en_10_1.pdf)
- [3] ANG, James B. CO<sub>2</sub> emissions, energy consumption, and output in France. *Energy Policy* [online]. 2007, **35**(10), 4772-4778 [cit. 2023-05-13]. ISSN 03014215. Dostupné z: doi:10.1016/j.enpol.2007.03.032
- [4] JANDL, Robert, Marcus LINDNER, Lars VESTERDAL et al. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?. *Geoderma* [online]. 2007, **137**(3-4), 253-268 [cit. 2023-05-13]. ISSN 00167061. Dostupné z: doi:10.1016/j.geoderma.2006.09.003
- [5] WOOLF, Dominic, James E. AMONETTE, F. Alayne STREET-PERROTT, Johannes LEHMANN a Stephen JOSEPH. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature Communications* [online]. 2010, **1**(1) [cit. 2023-03-16]. ISSN 2041-1723. Dostupné z: doi:10.1038/ncomms1053
- [6] SOHI, S.P., E. KRULL, R. BOLL a R. BOL. A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy* [online]. Academic Press Inc., 2010, **2010**(105), 47-82 [cit. 2022-03-24]. ISSN 00652113. Dostupné z: doi:10.1016/S0065-2113(10)05002-9
- [7] RAAB, A., M. TAKLA, T. RAAB, A. NICOLAY, A. SCHNEIDER, H. RÖSLER, K.-U. HEUBNER a E. BÖNISCH. Pre-industrial charcoal production in Lower Lusatia (Brandenburg, Germany): Detection and evaluation of a large charcoal-burning field by combining archaeological studies, GIS-based analyses of shaded-relief maps and dendrochronological age determination. *Quaternary International* [online]. 2015, **367**, 111-122 [cit. 2023-04-18]. ISSN 10406182. Dostupné z: doi:10.1016/j.quaint.2014.09.041
- [8] *Vývoj krajiny v České republice. Druhé doplnění*. Brno: Lipka - školské zařízení pro environmentální vzdělávání, 2016. ISBN 978-80-88212-02-7.
- [9] GLASER, Bruno a Jago BIRK. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). *Geochimica et Cosmochimica Acta* [online]. 2012, **2012**(82), 39-51 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.029>

- [10] MCKENDRY, Peter. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology* [online]. 2002, **83**(1), 37-46 [cit. 2023-02-08]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/S0960-8524(01)00118-3
- [11] AHMAD, Mahtab, Anushka RAJAPAKSHA, Jung LIM et al. Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere* [online]. 2014, **99**, 19-33 [cit. 2023-03-15]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2013.10.071
- [12] STEFANIDIS, Stylianos D., Konstantinos G. KALOGIANNIS, Eleni F. ILIOPOULOU, Chrysoula M. MICHAILOF, Petros A. PILAVACHI a Angelos A. LAPPAS. A study of lignocellulosic biomass pyrolysis via the pyrolysis of cellulose, hemicellulose and lignin. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [online]. 2014, **105**, 143-150 [cit. 2023-04-18]. ISSN 01652370. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaap.2013.10.013
- [13] YANG, Haiping, Rong YAN, Hanping CHEN, Dong Ho LEE a Chuguang ZHENG. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel* [online]. 2007, **86**(12-13), 1781-1788 [cit. 2023-02-08]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2006.12.013
- [14] KAMBO, Harpreet a Animesh DUTTA. A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2015, **45**, 359-378 [cit. 2023-03-06]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2015.01.050
- [15] KEILUWEIT, Marco, Peter S. NICO, Mark G. JOHNSON a Markus KLEBER. Dynamic Molecular Structure of Plant Biomass-Derived Black Carbon (Biochar). *Environmental Science & Technology* [online]. 2010, **44**(4), 1247-1253 [cit. 2023-04-18]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es9031419
- [16] TANG, Zhipei, Jianmin GAO, Yu ZHANG et al. Ultra-microporous biochar-based carbon adsorbents by a facile chemical activation strategy for high-performance CO<sub>2</sub> adsorption. *Fuel Processing Technology* [online]. 2023, **241** [cit. 2023-03-06]. ISSN 03783820. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuproc.2022.107613

- [17] UCHIMIYA, Minori, Isabel M. LIMA, K. THOMAS KLASSON, SeChin CHANG, Lynda H. WARTELLE a James E. RODGERS. Immobilization of Heavy Metal Ions (Cu II , Cd II , Ni II , and Pb II ) by Broiler Litter-Derived Biochars in Water and Soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* [online]. 2010, **58**(9), 5538-5544 [cit. 2023-04-13]. ISSN 0021-8561. Dostupné z: doi:10.1021/jf9044217
- [18] DJAENI, M., N. ASIAH, S SUHERMAN, A. SUTANTO a A. NURHASANAH. Energy Efficient Dryer with Rice Husk Fuel for Agriculture Drying. *International Journal of Renewable Energy Development* [online]. 2015, **4**(1), 20-24 [cit. 2023-05-11]. ISSN 2252-4940. Dostupné z: doi:10.14710/ijred.4.1.20-24
- [19] WANG, Jianlong a Shizong WANG. Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, **227**, 1002-1022 [cit. 2023-05-11]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.04.282
- [20] CHA, J.S., S.H. PARK, S.-C. JUNG, C. RYU, J.-K. JEON, M.-C. SHIN a Y.-K- PARK. Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [online]. 2015, **2015**(40), 1-15 [cit. 2022-03-31]. ISSN 1226086X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jiec.2016.06.002
- [21] CHA, Jin Sun, Sung Hoon PARK, Sang-Chul JUNG, Changkook RYU, Jong-Ki JEON, Min-Chul SHIN a Young-Kwon PARK. Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* [online]. 2016, **40**, 1-15 [cit. 2023-05-11]. ISSN 1226086X. Dostupné z: doi:10.1016/j.jiec.2016.06.002
- [22] CHEN, G., J. ANDRIES, Z. LUO a H. SPLIETHOFF. Biomass pyrolysis/gasification for product gas production: the overall investigation of parametric effects. *Energy Conversion and Management* [online]. 2003, **2003**(44), 1875-1884 [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: doi:10.1016/S0196-8904(02)00188-7
- [23] MOHAN, Dinesh, Ankur SARSWAT, Yong Sik OK a Charles U. PITTMAN. Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent – A critical review. *Bioresource Technology* [online]. 2014, **160**, 191-202 [cit. 2023-04-15]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2014.01.120

- [24] KARHU, Kristiina, Tuomas MATTILA, Irina BERGSTRÖM a Kristiina REGINA. Biochar addition to agricultural soil increased CH<sub>4</sub> uptake and water holding capacity – Results from a short-term pilot field study. *Agriculture, Ecosystems & Environment* [online]. 2011, **140**(1-2), 309-313 [cit. 2022-04-29]. ISSN 01678809. Dostupné z: doi:10.1016/j.agee.2010.12.005
- [25] SHAO, Fanfan, Senlin ZENG, Quanjiu WANG et al. Synergistic effects of biochar and carboxymethyl cellulose sodium (CMC) applications on improving water retention and aggregate stability in desert soils. *Journal of Environmental Management* [online]. 2023, **331**(331), 47-82 [cit. 2023-03-16]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2023.117305
- [26] MAO, Jiefei, Kun ZHANG a Baoliang CHEN. Linking hydrophobicity of biochar to the water repellency and water holding capacity of biochar-amended soil. *Environmental Pollution* [online]. 2019, **253**, 779-789 [cit. 2023-05-11]. ISSN 02697491. Dostupné z: doi:10.1016/j.envpol.2019.07.051
- [27] NGUYEN, Thi, Cheng-Yuan XU, Iman TAHMASBIAN, Rongxiao CHE, Zhihong XU, Xuhui ZHOU, Helen WALLACE a Shahla BAI. Effects of biochar on soil available inorganic nitrogen: A review and meta-analysis. *Geoderma* [online]. 2017, **288**, 79-96 [cit. 2023-03-06]. ISSN 00167061. Dostupné z: doi:10.1016/j.geoderma.2016.11.004
- [28] BERNAL, M.P., J.A. ALBURQUERQUE a R. MORAL. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology* [online]. 2009, **100**(22), 5444-5453 [cit. 2023-03-06]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2008.11.027
- [29] BRENNAN, John, Teresa BANDOSZ, Kendall THOMSON a Keith GUBBINS. Water in porous carbons. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* [online]. 2001, **187-188**, 539-568 [cit. 2023-03-06]. ISSN 09277757. Dostupné z: doi:10.1016/S0927-7757(01)00644-6
- [30] HAILEGNAW, Niguss, Filip MERCL, Kateřina PRAČKE, Jiřina SZÁKOVÁ a Pavel TLUSTOŠ. Mutual relationships of biochar and soil pH, CEC, and exchangeable base cations in a model laboratory experiment. *Journal of Soils and Sediments* [online]. 2019, **19**(5), 2405-2416 [cit. 2023-03-06]. ISSN 1439-0108. Dostupné z: doi:10.1007/s11368-019-02264-z
- [31] JOHANSEN, Jesper, Maiken NIELSEN, Mette VESTERGÅRD et al. The complexity of wood ash fertilization disentangled: Effects on soil pH, nutrient status, plant growth and cadmium accumulation. *Environmental and Experimental Botany* [online]. 2021, **185** [cit. 2023-03-06]. ISSN 00988472. Dostupné z: doi:10.1016/j.envexpbot.2021.104424

- [32] KIDD, Petra S. a John PROCTOR. Why plants grow poorly on very acid soils: are ecologists missing the obvious?. *Journal of Experimental Botany* [online]. 2001, **52**(357), 791-799 [cit. 2023-05-11]. ISSN 1460-2431. Dostupné z: doi:10.1093/jexbot/52.357.791
- [33] *Soil Processes and the Carbon Cycle: Nitrogen, Sulfur, and Phosphorus and the Sequestering of Carbon*. 1. London: CRC Press, 1997. ISBN 9780203739273.
- [34] LAL, R. Promise and limitations of soils to minimize climate change. *Journal of Soil and Water Conservation* [online]. 2008, **63**(4), 113-118 [cit. 2023-04-22]. ISSN 1941-3300. Dostupné z: doi:10.2489/jswc.63.4.113A
- [35] Biochar Solutions Production Equipment. In: *Biochar solutions* [online]. 11136 Flatiron Drive, Lafayette, CO: Biochar Solutions Inc., 2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <http://www.biocharsolutions.com/biochar-production-equipment.html>
- [36] GAUNT, John L. a Johannes LEHMANN. Energy Balance and Emissions Associated with Biochar Sequestration and Pyrolysis Bioenergy Production. *Environmental Science & Technology* [online]. 2008, **42**(11), 4152-4158 [cit. 2023-05-11]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es071361i
- [37] TINTNER, J., C. PREIMESBERGER, C. PFEIFER, J. THEINER, F. OTTNER, K. WRIESSNIG, M. PUCHBERGER a E. SMIDT. Pyrolysis profile of a rectangular kiln – natural scientific investigation of a traditional charcoal production process. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* [online]. 2020, **146** [cit. 2022-04-08]. ISSN 01652370. Dostupné z: doi:10.1016/j.jaap.2019.104757
- [38] CORNELISSEN, Gerard, Naba Raj PANDIT, Paul TAYLOR, Bishnu Hari PANDIT, Magnus SPARREVIK, Hans Peter SCHMIDT a Ben BOND-LAMBERTY. Emissions and Char Quality of Flame-Curtain "Kon Tiki" Kilns for Farmer-Scale Charcoal/Biochar Production. *PLOS ONE* [online]. 2016, **11**(5) [cit. 2023-05-10]. ISSN 1932-6203. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0154617
- [39] TUOMELA, M. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. *Bioresource Technology* [online]. 2000, **72**(2), 169-183 [cit. 2023-03-06]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/S0960-8524(99)00104-2
- [40] POSPÍŠIL, Jiří a Josef LOS. Kompost a kompostárny: mapování situace v ČR. In: *Biom.cz* [online]. Praha: České sdružení pro biomasu, 2021 [cit. 2023-05-12]. Dostupné z: <https://biom.cz/cz/odborne-clanky/kompost-a-kompostarny-mapovani-situace-v-cr>
- [41] BERNAL, M.P., J.A. ALBURQUERQUE a R. MORAL. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. A review. *Bioresource Technology* [online]. 2009, **100**(22), 5444-5453 [cit. 2023-05-19]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2008.11.027

- [42] LIM, Su, Leong LEE a Ta WU. Sustainability of using composting and vermicomposting technologies for organic solid waste biotransformation: recent overview, greenhouse gases emissions and economic analysis. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2016, **111**, 262-278 [cit. 2022-04-29]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.083
- [43] MORETTI, P., J. MORAIS DE ARAUJO, A. BORGES DE CASTILHOS, P. BUFFIÈRE, R. GOURDON a R. BAYARD. Characterization of municipal biowaste categories for their capacity to be converted into a feedstock aqueous slurry to produce methane by anaerobic digestion. *Science of The Total Environment* [online]. 2020, **716** [cit. 2023-05-12]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137084
- [44] Hugelkultur: Composting Whole Trees With Ease. In: *Permaculture Research Institution* [online]. New South York: Permaculture Research Institution, 2012 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://www.permaculturenews.org/2012/01/04/hugelkultur-composting-whole-trees-with-ease/#more-6825>
- [45] ATKINSON, Christopher, Jean FITZGERALD a Neil HIPPS. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant and Soil* [online]. 2010, **337**(1-2), 1-18 [cit. 2023-03-15]. ISSN 0032-079X. Dostupné z: doi:10.1007/s11104-010-0464-5
- [46] LI, Hongbo, Xiaoling DONG, Evandro B. DA SILVA, Letuzia M. DE OLIVEIRA, Yanshan CHEN a Lena Q. MA. Mechanisms of metal sorption by biochars: Biochar characteristics and modifications. *Chemosphere* [online]. 2017, **178**, 466-478 [cit. 2023-04-13]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2017.03.072
- [47] CAO, Xinde, Lena MA, Yuan LIANG, Bin GAO a Willie HARRIS. Simultaneous Immobilization of Lead and Atrazine in Contaminated Soils Using Dairy-Manure Biochar. *Environmental Science & Technology* [online]. 2011, **45**(11), 4884-4889 [cit. 2023-03-15]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es103752u
- [48] CHEN, Tan, Yaxin ZHANG, Hongtao WANG, Wenjing LU, Zeyu ZHOU, Yuancheng ZHANG a Lulu REN. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge. *Bioresource Technology* [online]. 2014, **164**, 47-54 [cit. 2023-04-13]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2014.04.048



- [49] TOMCZYK, Agnieszka, Zofia SOKOŁOWSKA a Patrycja BOGUTA. Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* [online]. 2020, **19**(1), 191-215 [cit. 2023-04-13]. ISSN 1569-1705. Dostupné z: doi:10.1007/s11157-020-09523-3
- [50] WU, Zhenfu, Xiaomei SUN, Yueqi SUN, Junying YAN, Yanfeng ZHAO a Jie CHEN. Soil acidification and factors controlling topsoil pH shift of cropland in central China from 2008 to 2018. *Geoderma* [online]. 2022, **408** [cit. 2023-03-15]. ISSN 00167061. Dostupné z: doi:10.1016/j.geoderma.2021.115586
- [51] *European Food Safety Authority* [online]. Via Carlo Magno 1A, Italy: European Union, 2023 [cit. 2023-03-06]. Dostupné z: <https://www.efsa.europa.eu/en>
- [52] ABDEL-SHAIFY, Hussein I. a Mona S.M. MANSOUR. A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum* [online]. 2016, **25**(1), 107-123 [cit. 2023-05-10]. ISSN 11100621. Dostupné z: doi:10.1016/j.ejpe.2015.03.011
- [53] MOHAN, Dinesh, Charles PITTMAN a Philip STEELE. Pyrolysis of Wood/Biomass for Bio-oil: A Critical Review. *Energy & Fuels* [online]. 2006, **20**(3), 848-889 [cit. 2023-04-09]. ISSN 0887-0624. Dostupné z: doi:10.1021/ef0502397
- [54] Teplota hoření palivového dřeva. In: *iBuilder* [online]. Česká republika: iBuilder, 2015 [cit. 2023-04-09]. Dostupné z: <https://ibuilder-cs.techinfus.com/drova/temperatura-goreniya/#:~:text=Ve%20v%C4%9Bt%C5%A1in%C4%9B%20p%C5%99%C3%ADpad%C5%AF%20se%20teplota%20ohn%C4%9B%20podle%20v%C3%BDsledk%C5%AF,Je%20to%20konstrukce%2C%20kter%C3%A1%20ur%C4%8Duje%20rychlost%20do d%C3%A1vky%20kysl%C3%ADku>.
- [55] LIU, Zhengang, Fu-Shen ZHANG a Jianzhi WU. Characterization and application of chars produced from pinewood pyrolysis and hydrothermal treatment. *Fuel* [online]. 2010, **89**(2), 510-514 [cit. 2023-04-09]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2009.08.042
- [56] KLOSS, Stefanie, Franz ZEHETNER, Alex DELLANTONIO et al. Characterization of Slow Pyrolysis Biochars: Effects of Feedstocks and Pyrolysis Temperature on Biochar Properties. *Journal of Environmental Quality* [online]. 2012, **41**(4), 990-1000 [cit. 2023-04-10]. ISSN 00472425. Dostupné z: doi:10.2134/jeq2011.0070
- [57] LIU, Pei, Wu-Jun LIU, Hong JIANG, Jie-Jie CHEN, Wen-Wei LI a Han-Qing YU. Modification of bio-char derived from fast pyrolysis of biomass and its application in removal of tetracycline from aqueous solution. *Bioresource Technology* [online]. 2012, **121**, 235-240 [cit. 2023-04-10]. ISSN 09608524. Dostupné z: doi:10.1016/j.biortech.2012.06.085

- [58] JEFFERY, S., F.G.A. VERHEIJEN, M. VAN DER VELDE a A.C. BASTOS. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* [online]. 2011, **144**(1), 175-187 [cit. 2023-04-11]. ISSN 01678809. Dostupné z: doi:10.1016/j.agee.2011.08.015
- [59] BARONTI, Silvia, Giorgio ALBERTI, Gemini DELLE VEDOVE et al. The Biochar Option to Improve Plant Yields: First Results From Some Field and Pot Experiments in Italy. *Italian Journal of Agronomy* [online]. 2010, **5**(1), 3-12 [cit. 2023-04-11]. ISSN 2039-6805. Dostupné z: doi:10.4081/ija.2010.3
- [60] KAMMANN, Claudia Irene, Sebastian LINSEL, Johannes W. GÖBLING a Hans-Werner KOYRO. Influence of biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa* Willd and on soil–plant relations. *Plant and Soil* [online]. 2011, **345**(1-2), 195-210 [cit. 2023-04-11]. ISSN 0032-079X. Dostupné z: doi:10.1007/s11104-011-0771-5
- [61] RAJKOVICH, Shelby, Akio ENDERS, Kelly HANLEY, Charles HYLAND, Andrew R. ZIMMERMAN a Johannes LEHMANN. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. *Biology and Fertility of Soils* [online]. 2012, **48**(3), 271-284 [cit. 2023-04-11]. ISSN 0178-2762. Dostupné z: doi:10.1007/s00374-011-0624-7
- [62] BIEDERMAN, Lori A. a W. Stanley HARPOLE. Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis. *GCB Bioenergy* [online]. 2013, **5**(2), 202-214 [cit. 2023-04-11]. ISSN 17571693. Dostupné z: doi:10.1111/gcbb.12037
- [63] BUECKER, J., Stefanie KLOSS, B. WIMMER, F. REMPT, F. ZEHETNER a G. SOJA. Leachate Composition of Temperate Agricultural Soils in Response to Biochar Application. *Water, Air, & Soil Pollution* [online]. 2016, **227**(2) [cit. 2023-04-20]. ISSN 0049-6979. Dostupné z: doi:10.1007/s11270-016-2745-y
- [64] KLOSS, Stefanie, Franz ZEHETNER, Eva OBURGER, Jannis BUECKER, Barbara KITZLER, Walter W. WENZEL, Bernhard WIMMER a Gerhard SOJA. Trace element concentrations in leachates and mustard plant tissue (*Sinapis alba* L.) after biochar application to temperate soils. *Science of The Total Environment* [online]. 2014, **481**, 498-508 [cit. 2023-04-20]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2014.02.093

- [65] CHEN, Baoliang, Dandan ZHOU a Lizhong ZHU. Transitional Adsorption and Partition of Nonpolar and Polar Aromatic Contaminants by Biochars of Pine Needles with Different Pyrolytic Temperatures. *Environmental Science & Technology* [online]. 2008, **42**(14), 5137-5143 [cit. 2023-04-18]. ISSN 0013-936X. Dostupné z: doi:10.1021/es8002684
- [66] UCHIMIYA, Minori, Lynda H. WARTELLE, Isabel M. LIMA a K. Thomas KLASSON. Sorption of Deisopropylatrazine on Broiler Litter Biochars. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* [online]. 2010, **58**(23), 12350-12356 [cit. 2023-04-18]. ISSN 0021-8561. Dostupné z: doi:10.1021/jf102152q
- [67] HOSSAIN, Mustafa K., Vladimir STREZOV, K. Yin CHAN, Artur ZIOLKOWSKI a Peter F. NELSON. Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management* [online]. 2011, **92**(1), 223-228 [cit. 2023-04-13]. ISSN 03014797. Dostupné z: doi:10.1016/j.jenvman.2010.09.008
- [68] TCHOUNWOU, Paul B., Clement G. YEDJOU, Anita K. PATLOLLA a Dwayne J. SUTTON. Heavy Metal Toxicity and the Environment. In: LUCH, Andreas, ed. *Molecular, Clinical and Environmental Toxicology* [online]. Basel: Springer Basel, 2012, s. 133-164 [cit. 2023-04-13]. Experientia Supplementum. ISBN 978-3-7643-8339-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-7643-8340-4\_6
- [69] KOCHIAN, Leon V., Owen A. HOEKENGA a Miguel A. PIÑEROS. HOW DO CROP PLANTS TOLERATE ACID SOILS? MECHANISMS OF ALUMINUM TOLERANCE AND PHOSPHOROUS EFFICIENCY. *Annual Review of Plant Biology* [online]. 2004, **55**(1), 459-493 [cit. 2023-04-13]. ISSN 1543-5008. Dostupné z: doi:10.1146/annurev.arplant.55.031903.141655
- [70] NAGAJYOTI, P. C., K. D. LEE a T. V. M. SREEKANTH. Heavy metals, occurrence and toxicity for plants: a review. *Environmental Chemistry Letters* [online]. 2010, **8**(3), 199-216 [cit. 2023-04-13]. ISSN 1610-3653. Dostupné z: doi:10.1007/s10311-010-0297-8
- [71] JANSEN, M. a H. P. LETSCHERT. Inorganic yellow-red pigments without toxic metals. *Nature* [online]. 2000, **404**(6781), 980-982 [cit. 2023-04-15]. ISSN 0028-0836. Dostupné z: doi:10.1038/35010082
- [72] TOMCZAK, Jan M., Leonid V. POUROVSKII, Loig VAUGIER, Antoine GEORGES a Silke BIERMANN. Rare-earth vs. heavy metal pigments and their colors from first principles. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [online]. 2013, **110**(3), 904-907 [cit. 2023-04-15]. ISSN 0027-8424. Dostupné z: doi:10.1073/pnas.1215066110
- [73] Heavy Metals Regulations in the European Union: An Overview. In: *ComplianceGate* [online]. HongKong: AsiaImportal (HK) limited, 2023 [cit. 2023-04-15]. Dostupné z: <https://www.compliancegate.com/heavy-metal-regulations-european-union/#REACH>

- [74] YU, Ok-Youn, Brian RAICHLE a Sam SINK. Impact of biochar on the water holding capacity of loamy sand soil. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* [online]. 2013, **4**(1) [cit. 2023-04-15]. ISSN 2251-6832. Dostupné z: doi:10.1186/2251-6832-4-44
- [75] REHMAN, Abdul, Shahid NAWAZ, Huda Ahmed ALGHAMDI, Sulaiman ALRUMMAN, Wei YAN a Muhammad Zohaib NAWAZ. Effects of manure-based biochar on uptake of nutrients and water holding capacity of different types of soils. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* [online]. 2020, **2** [cit. 2023-04-15]. ISSN 26660164. Dostupné z: doi:10.1016/j.cscee.2020.100036
- [76] ADHIKARI, Sirjana, M.A. Parvez MAHMUD, Minh Duc NGUYEN a Wendy TIMMS. Evaluating fundamental biochar properties in relation to water holding capacity. *Chemosphere* [online]. 2023, **328** [cit. 2023-05-09]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2023.138620
- [77] WERDIN, Joerg, Tim D. FLETCHER, John P. RAYNER, Nicholas S.G. WILLIAMS a Claire FARRELL. Biochar made from low density wood has greater plant available water than biochar made from high density wood. *Science of The Total Environment* [online]. 2020, **705** [cit. 2023-04-18]. ISSN 00489697. Dostupné z: doi:10.1016/j.scitotenv.2019.135856
- [78] LIU, Chen, Honglan WANG, Xiangyu TANG, Zhuo GUAN, Brian J. REID, Anushka Upamali RAJAPAKSHA, Yong Sik OK a Hui SUN. Biochar increased water holding capacity but accelerated organic carbon leaching from a sloping farmland soil in China. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. 2016, **23**(2), 995-1006 [cit. 2023-04-18]. ISSN 0944-1344. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-015-4885-9
- [79] FARRAR, Michael B., Helen M. WALLACE, Cheng-Yuan XU, Thi Thu Nhan NGUYEN, Ehsan TAVAKKOLI, Stephen JOSEPH a Shahla Hosseini BAI. Short-term effects of organo-mineral enriched biochar fertiliser on ginger yield and nutrient cycling. *Journal of Soils and Sediments* [online]. 2019, **19**(2), 668-682 [cit. 2023-04-15]. ISSN 1439-0108. Dostupné z: doi:10.1007/s11368-018-2061-9

- [80] TIAN, Xiaoqin, Zhuo LI, Longchang WANG, Yifan WANG, Biao LI, Meichun DUAN a Bangyan LIU. Effects of Biochar Combined with Nitrogen Fertilizer Reduction on Rapeseed Yield and Soil Aggregate Stability in Upland of Purple Soils. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [online]. 2020, **17**(1) [cit. 2023-04-15]. ISSN 1660-4601. Dostupné z: doi:10.3390/ijerph17010279
- [81] FARRAR, Michael B., Helen M. WALLACE, Cheng-Yuan XU, Stephen JOSEPH, Thi Thu Nhan NGUYEN, Peter K. DUNN a Shahla Hosseini BAI. Biochar compound fertilisers increase plant potassium uptake 2 years after application without additional organic fertiliser. *Environmental Science and Pollution Research* [online]. 2022, **29**(5), 7170-7184 [cit. 2023-04-15]. ISSN 0944-1344. Dostupné z: doi:10.1007/s11356-021-16236-9
- [82] CHIA, Chee H., Bin GONG, Stephen D. JOSEPH, Christopher E. MARJO, Paul MUNROE a Anne M. RICH. Imaging of mineral-enriched biochar by FTIR, Raman and SEM–EDX. *Vibrational Spectroscopy* [online]. 2012, **62**, 248-257 [cit. 2023-04-18]. ISSN 09242031. Dostupné z: doi:10.1016/j.vibspec.2012.06.006
- [83] SKOOG, Douglas A., Donald M. WEST, F. James HOLLER a Stanley R. CROUCH. *Analytická chemie*. Vydání: první. Přeložil Karel NESMĚRÁK, přeložil Václav ČERVENÝ, přeložil Tomáš KRÍŽEK, přeložil Eliška NOVÁKOVÁ. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2019. ISBN 9788075920430.
- [84] COLE, Emily J., Omid R. ZANDVAKILI, Baoshan XING, Masoud HASHEMI, Stephen HERBERT a Hamid H. MASHAYEKHI. Dataset on the effect of hardwood biochar on soil gravimetric moisture content and nitrate dynamics at different soil depths with FTIR analysis of fresh and aged biochar. *Data in Brief* [online]. 2019, **25** [cit. 2023-05-13]. ISSN 23523409. Dostupné z: doi:10.1016/j.dib.2019.104073
- [85] CHEN, Baoliang a Zaiming CHEN. Sorption of naphthalene and 1-naphthol by biochars of orange peels with different pyrolytic temperatures. *Chemosphere* [online]. 2009, **76**(1), 127-133 [cit. 2023-05-09]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2009.02.004

- [86] BEESLEY, Luke, Eduardo MORENO-JIMÉNEZ a Jose L. GOMEZ-EYLES. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environmental Pollution* [online]. 2010, **158**(6), 2282-2287 [cit. 2023-05-10]. ISSN 02697491. Dostupné z: doi:10.1016/j.envpol.2010.02.003
- [87] HILBER, Isabel, Philipp MAYER, Varvara GOULIARMOU, Sarah E. HALE, Gerard CORNELISSEN, Hans-Peter SCHMIDT a Thomas D. BUCHELI. Bioavailability and bioaccessibility of polycyclic aromatic hydrocarbons from (post-pyrolytically treated) biochars. *Chemosphere* [online]. 2017, **174**, 700-707 [cit. 2023-05-10]. ISSN 00456535. Dostupné z: doi:10.1016/j.chemosphere.2017.02.014
- [88] Regulation (EU) 2019/1009: Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003 (Text with EEA relevance). In: *Eur-Lex* [online]. Luxembourg: Publication Office of the European Union, 2019 [cit. 2023-05-13]. Dostupné z: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj>

## 7. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

BET	Braunauer-Emmet-Teller adsorpční izoterma
EBC	Evropský biouhelný certifikát
EFSA	European food safety agency
EU	Evropská unie
FTIR	Infračervená spektroskopie s Fourierovou transformací
GC	Plynová chromatografie
ICP-OES	Optická emisní spektroskopie s indukčně vázaným plazmatem
KVK	Kapacita výměny kationtů
MS	Hmotnostní spektrometrie
PAU	Polycyklické aromatické uhlovodíky
REACH	Registration, Evaluation, Autorisation and restriction of Chemicals
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie